

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**OPTIMISATION GLOBALE DES OPÉRATIONS LOGISTIQUES DANS UNE CHAÎNE
D'APPROVISIONNEMENT À VASTE ÉTENDUE GÉOGRAPHIQUE**

MARC ANDRÉ VIAU
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)
DÉCEMBRE 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-25583-4

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-25583-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

OPTIMISATION GLOBALE DES OPÉRATIONS LOGISTIQUES DANS UNE CHAÎNE
D'APPROVISIONNEMENT À VASTE ÉTENDUE GÉOGRAPHIQUE

présenté par : VIAU Marc André

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. AGARD Bruno, Doctorat, président

M. TRÉPANIÉ Martin, ing. Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

M. ROUSSEAU Louis-Martin, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), qui m'a octroyé une bourse d'études supérieures d'une durée de 24 mois. En plus de me permettre de me concentrer sur mes études, cette bourse m'a donné plus de latitude au niveau du choix de mon sujet de recherche, ce qui m'a permis de découvrir un domaine de recherche pour lequel j'ai beaucoup d'intérêts.

J'aimerais également souligner l'appui particulier de mon directeur de recherche, M. Martin Trépanier, ainsi que de mon co-directeur, M. Pierre Baptiste. Ces deux chercheurs ont su me guider vers des pistes de recherche intéressantes, en plus de m'apporter une aide technique permettant d'enrichir mes travaux de recherche.

Par ailleurs, j'aimerais remercier le personnel du département de l'approvisionnement à l'usine de Paccar du Canada située à Ste-Thérèse (QC), en particulier M^{me} Diane DuRuisseau et M. Guy Lahaie, qui m'ont permis d'exploiter un terrain d'expérimentation idéal mon pour sujet de recherche.

Finalement, je tiens à remercier mes proches pour le support incroyable qu'ils m'ont offert ces deux dernières années. Depuis le tout début, ils ont cru en mes capacités et ils n'ont jamais cessé de m'encourager, surtout lors des moments les plus difficiles.

RÉSUMÉ

De nos jours, l'optimisation de la chaîne logistique est devenue une préoccupation majeure pour les entreprises d'envergure internationale. Après s'être concentrées sur l'optimisation de leur production au cours des dernières décennies, ces entreprises ont réalisé que pour être compétitives, elles doivent propager les principes de la production allégée (*lean manufacturing*), si bien appliqués dans leurs usines, à travers leur chaîne d'approvisionnement. Aujourd'hui, toutes ces entreprises ne jurent que par le juste-à-temps (JAT). En effet, cette technique d'approvisionnement en flux tirés force la réduction des inventaires et permet de répondre aux besoins de flexibilité des usines, puisque les composants requis à court terme peuvent être reçus à un moment précis. Par contre, lorsque les différents partenaires commerciaux formant la chaîne logistique sont dispersés sur une vaste étendue géographique, l'approvisionnement en JAT devient un défi de taille. Il s'agit alors de synchroniser la chaîne de façon à permettre le JAT, sans toutefois faire gonfler les coûts de transport.

Ce projet de recherche s'attaque à l'optimisation globale des opérations logistiques dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique. Plus précisément, deux objectifs principaux ont été atteints, soit l'intégration des activités de transport et de gestion des inventaires dans un modèle visant à minimiser les coûts logistiques totaux, ainsi que le développement d'un système d'aide à la décision (SAD) permettant d'analyser le comportement d'un système logistique en fonction de la variation de divers paramètres et variables de décision.

La littérature dans le domaine de l'optimisation des opérations logistiques d'approvisionnement a permis de découvrir le *Collaborative Transportation Management*. Le CTM est une technique de gestion centralisée des opérations logistiques qui, grâce à la collaboration de plusieurs fournisseurs, transporteurs et usines, permet de réduire les coûts de transport, en plus de favoriser les opérations de JAT. En effet, à l'aide du modèle développé dans ce mémoire, il a été possible de constater que la centralisation de la gestion des opérations d'approvisionnement permet de réduire considérablement les coûts logistiques totaux encourus par les donneurs d'ordres (c'est-à-dire les usines approvisionnées). Entre autres, l'utilisation plus importante des opérations de consolidation et de transbordement résulte en une réduction considérable des coûts de transport. Par ailleurs, l'étude de cette gestion centralisée a aussi permis d'observer que, pour

un niveau de service donné, plus une usine est éloignée de ses fournisseurs, plus elle doit supporter des coûts logistiques élevés.

Pour effectuer ces observations, un modèle mathématique a d'abord été développé et intégré dans un SAD. La revue de littérature a mis en évidence le fait que les modèles d'optimisation globale incluant les opérations de transport et la gestion des inventaires comportent d'importantes lacunes. En général, les réseaux de transport modélisés sont simplistes et les inventaires en transit ne sont pas pris en compte. Néanmoins, l'apport de la littérature pour déterminer la structure du modèle s'est avéré considérable. D'une part, il a été possible de reconnaître le potentiel des problèmes de flot à coût minimum pour modéliser des réseaux de transport complexes. D'autre part, les fréquences et les phases de livraison ont été identifiées comme étant les variables décisionnelles idéales pour étudier l'optimisation globale d'une chaîne logistique, puisqu'elles ont un impact direct sur les niveaux d'inventaires à travers la chaîne, ainsi que sur les opérations de transport.

Pour être en mesure de modéliser les opérations logistiques d'une chaîne d'approvisionnement de complexité et de taille réelles, une approche de modélisation combinant la simulation et l'optimisation a été privilégiée. En effet, le SAD présenté dans ce mémoire permet d'optimiser globalement une chaîne d'approvisionnement en simulant les opérations logistiques pour un horizon de planification donné. Ce SAD génère des scénarios d'approvisionnement en faisant varier les fréquences et les phases de livraison, ainsi qu'en fixant les valeurs de certains paramètres à l'étude (le taux de transport, le coût pour maintenir en inventaire une unité de la pièce i durant une période donnée, ainsi que la distance moyenne séparant les usines des fournisseurs). L'évaluation des scénarios consiste à déterminer les coûts d'inventaires et à optimiser les opérations de transport. Ainsi, il est possible de calculer les coûts logistiques totaux et de comparer les résultats de plusieurs scénarios. Bref, tout comme la technique du CTM, ce SAD permet de gérer de façon centrale les opérations logistiques de plusieurs usines.

Le SAD est composé de deux modules distincts. Le premier module modélise et calcule les niveaux d'inventaires, alors que le second modélise et optimise les opérations de transport. D'abord, le premier module détermine les inventaires en transit, ainsi que les inventaires en main, et ce, en fonction des fréquences et des phases de livraison. Il est à noter que la modélisation des inventaires en main considère le stock entreposé durant les fins de semaines, en

plus d'inclure un coefficient pour tenir compte de la variabilité des niveaux d'inventaires. Puis, le second module du SAD permet de résoudre un problème de transport pour chaque période « active » de l'horizon de planification (par exemple, du lundi au vendredi). La livraison des commandes aux usines est modélisée à l'aide d'un problème de flot à coût minimum. En effet, il s'agit de construire un graphe modélisant le réseau de transport et de minimiser, à l'aide d'un programme linéaire, la distance totale à parcourir pour livrer les commandes. Étant donné la taille des problèmes à résoudre, un processus de réduction de la taille du graphe a été défini. Ce processus permet de réduire de 60% à 90% le nombre total de variables.

Pour étudier l'optimisation globale des opérations logistiques, un plan d'expérience comportant une série de quatre expérimentations a été élaboré, et le SAD a été programmé dans une base de données Microsoft Access. De plus, la chaîne d'approvisionnement des usines nord-américaines de Paccar Inc, une multinationale spécialisée dans l'assemblage de camions, s'est avéré le terrain d'expérimentation. En fait, un échantillon de cette chaîne logistique comprenant 42 fournisseurs et quatre usines a été modélisé.

Les résultats obtenus suite aux expérimentations sont très intéressants. D'abord, comme il a été mentionné, la centralisation de la gestion des opérations logistiques permet de réduire considérablement les coûts de transport. Puis, l'analyse de l'impact des fréquences et des phases de livraison sur les opérations logistiques a mis en évidence le fait que les coûts d'inventaires représentent moins de 5% des coûts logistiques totaux. Néanmoins, le contrôle des inventaires est une activité qui doit indéniablement être prise en compte pour optimiser globalement les opérations logistiques, puisque la rotation des stocks est une mesure de performance indispensable en JAT. Par ailleurs, les expérimentations ont montré qu'il est possible d'augmenter le niveau de service dans une chaîne d'approvisionnement sans faire gonfler les coûts logistiques. Pour ce faire, il est nécessaire d'augmenter les fréquences de livraison en suivant diverses stratégies favorisant les opérations de consolidation. De plus, il est possible d'optimiser les phases de livraison. En effet, pour ce qui est de la chaîne d'approvisionnement étudiée dans ce mémoire, l'optimisation des phases de livraison a permis de réduire les coûts logistiques totaux de plus de 6%. Enfin, l'étude de l'impact de certains paramètres sur les opérations logistiques a montré que la distance séparant les fournisseurs des usines est, parmi les trois paramètres étudiés, celui qui influence le plus les coûts logistiques totaux.

Les observations effectuées ont permis d'établir les lignes directrices d'un processus d'optimisation des opérations logistiques pour les chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique. Ce processus comporte quatre étapes principales, soit la centralisation de la gestion des opérations logistiques, l'augmentation stratégique des fréquences de livraison, l'optimisation des phases de livraison et la considération des contraintes opérationnelles. Ce processus vise à augmenter le niveau de service dans la chaîne d'approvisionnement, c'est-à-dire la fréquence moyenne de livraison, tout en minimisant les coûts logistiques totaux.

En somme, bien que le SAD développé dans ce mémoire ait permis de modéliser les opérations logistiques d'un réseau de transport complexe, il n'est pas approprié pour optimiser de façon quotidienne une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique. Pour ce faire, des outils technologiques plus puissants doivent être utilisés, notamment au niveau de l'optimisation des opérations de transport et du système de collecte de données. Entre autres, un SAD amélioré permettrait d'effectuer des expérimentations visant à étudier l'impact de la taille du réseau de transport au niveau des stratégies d'optimisation à adopter.

ABSTRACT

Nowadays, global optimization of the supply chain is a major issue for companies of international scale. After spending the last decades optimizing their manufacturing operations, these companies realized that they needed to extend lean manufacturing principles outside their plants, downstream the supply chain. This is why just-in-time (JIT) supply was so quickly adopted by OEMs (Original Equipment Manufacturers). Actually, this supply technique forces inventory reduction and enables to answer the plants needs for flexibility and diversity, because required components only can be received at the right time. However, for spread supply chains, JIT supply represents a great challenge because of transit times. When suppliers and plants are spread on a wide area, the main objective is to synchronize the supply chain to be able to accelerate material flow throughout the chain without increasing transportation costs.

This research project tackles global optimization of logistic operations in a spread supply chain. More precisely, two major objectives were achieved, i.e. integrating transportation and inventory control operations in an optimization model aiming at minimizing total logistic costs, and developing a decision support system (DSS) to study the behavior of spread supply chains.

A literature review in the field of logistic operations management and optimization made it possible to discover Collaborative Transportation Management. CTM is a centralized management technique for logistic operations that allows reducing transportation costs and supporting JIT supply by enabling the collaboration of multiple suppliers, carriers and plants. Actually, experiments carried out with the model developed in this paper showed that centralization of logistic operations management can reduce total logistic costs by more than 25%. An increased use of consolidation and transshipment operations is the main reason that explains the reduction of transportation costs and, therefore, total logistic costs.

In order to study global optimization of logistic activities, a mathematical model was developed and integrated into a DSS. Actually, the literature review helped to determine the basic ideas of the model and the structure of the DSS. Even though the majority of transportation networks modeled are simplistic and that inventories in transit are seldom taken into account, several interesting models were analyzed. Indeed, it was possible to notice the potential of minimum cost flow problems to model complex transportation networks. Moreover, delivery frequencies

and phases were identified as being ideal decision variables to study global optimization of spread supply chains because they affect both inventory control and transportation operations. Finally, it was observed that problems of real size and complexity could not be adequately modeled and optimized with an analytical model. Therefore, a modeling approach combining simulation and optimization was privileged.

By simulating logistic operations for a given planning horizon, the DSS presented in this paper enables a global optimization of the supply chain. Actually, this DSS generates different procurement scenarios by varying delivery frequencies and phases, and by setting the values of the three parameters studied (transportation rate, percentage of the components value that is computed as inventory holding cost and the average distance separating suppliers and plants). Moreover, it determines total logistic costs (incurred by the plants) by calculating inventory levels throughout the supply chain and by optimizing transportation operations. Thus, it integrates transportation and inventory control operations in two separate modules.

The first module calculates inventory holding costs by determining inventories in transit (from supplier's docks to plant's docks) and inventories on hand (into the plants) according to the delivery frequencies and phases. Regarding the inventories on hand, it is important to note that inventories held during weekends are taken into account. The variability of inventory levels (demand variability during the planning horizon, variations due to early/late deliveries, *etc.*) is also considered.

The second module of the DSS calculates transportation costs. It resolves a transportation problem for each "active" period of the planning horizon (for example, from Monday to Friday). At each "active" period, the delivery of orders to the plants is modeled using a minimum cost flow problem. Indeed, a graph representing the transportation network is built and the total distance traveled to deliver the orders is minimized with a linear program. Because the DSS aims at solving large size problems, a size reduction process was defined. Actually, this process allows reducing the total number of variables by 60% to 90%.

To study the behavior of spread supply chains, an experimental design comprising a series of four experiments was worked out and the DSS was programmed in a Microsoft Access database. To carry out the experiments, a real supply chain was modeled. Actually, the data was gathered

from Paccar's North-American supply chain (Paccar is a multinational company that assembles trucks). A sample of 42 suppliers, three transshipment centers and four plants was used.

The results obtained from the experiments are very interesting. First, as mentioned, centralizing logistic operations management allows reducing transportation costs. Second, the analysis of the impact of delivery frequencies and phases on total logistic costs showed that inventory holding costs represent less than 5% of total costs. Nevertheless, for global optimization, inventory control has to be considered because inventory turnover is a crucial performance measure for JIT supply. Third, the experiments showed that it is possible to increase delivery frequencies in a spread supply chain without increasing total logistic costs dramatically. To do so, different optimization strategies have to be followed in order to benefit from consolidation and transshipment operations. Moreover, analyzing delivery phases can also help to increase delivery frequencies. Actually, for the supply chain studied in this paper, optimization of delivery phases reduced total logistic costs by more than 6%. Finally, a study of the impact of different parameters on logistic costs showed that the distance separating suppliers and plants affects directly inventory holding and transportation costs.

Considering these observations, an optimization process for logistic operations in a spread supply chains was defined. This process contains four basic ideas: centralization of logistic operations management, strategic increase of delivery frequencies, optimization of delivery phases and operational constraints consideration. Actually, it uses delivery frequencies and phases as global decision variables to ensure a good inventory turnover rate and, at the same time, to minimize total logistic costs.

To conclude, even though the DSS developed in this research project allows modeling logistic operations of complex supply chains, it is not appropriate to manage and optimize a real supply chain on a daily basis. Actually, more powerful tools should be used. For example, to link suppliers, carriers and plants, a web based database would be necessary. Moreover, many 3PLs developed specialized mathematical algorithms to solve transportation problems. In short, a more powerful DSS could be used to test larger problems and to confirm the results obtained in this paper.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES FIGURES.....	xv
LISTE DES ANNEXES.....	xvi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xvii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : CONTEXTE OPÉRATIONNEL DE PACCAR	5
1.1. Dispersion géographique des fournisseurs.....	5
1.2. Gestion des inventaires	6
1.3. Gestion des opérations de transport.....	7
CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	9
2.1. Centralisation de la gestion des opérations logistiques.....	9
2.1.1. Raison d’être, éléments clés et avantages du CTM.....	10
2.1.2. Le CTM et les technologies de l’information	13
2.1.3. Éloignement des partenaires commerciaux impliqués.....	13
2.2. Modèles logistiques globaux	14
2.2.1. Intégration et modélisation d’une chaîne logistique	14
2.2.2. Mesures de performance	15
2.2.3. Modélisation des coûts logistiques.....	17
2.2.4. Modèles EOQ vs JAT	20
2.2.5. Revue des modèles d’optimisation globale en logistique	21
2.2.6. Modèles de flot à coût minimum	30
2.2.7. Outils logiciels et solutions développées sur mesure	32
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE	36
3.1. Définition du problème.....	36
3.2. Approche de modélisation	38
3.3. Variables de décision et paramètres à l’étude.....	41
3.4. Plan d’expérience.....	43

CHAPITRE 4 :	DÉVELOPPEMENT DU SAD	46
4.1.	Structure du SAD.....	46
4.2.	Modélisation des inventaires	49
4.3.	Modélisation des opérations de transport	52
4.3.1.	Problème de flot à coût minimum	53
4.3.2.	Construction du graphe	54
4.3.3.	Modèle mathématique.....	57
4.3.4.	Hypothèses de validité du modèle.....	59
4.3.5.	Taille du problème de transport	61
4.4.	Programmation du SAD.....	65
CHAPITRE 5 :	EXPÉRIMENTATIONS	68
5.1.	Description du problème résolu.....	68
5.2.	Résolution des problèmes de transport	70
5.3.	Présentation et analyse des résultats	72
5.3.1.	Expérimentation <i>E1</i>	72
5.3.2.	Expérimentation <i>E2</i>	75
5.3.3.	Expérimentation <i>E3</i>	79
5.3.4.	Expérimentation <i>E4</i>	82
CHAPITRE 6 :	DISCUSSION	84
6.1.	Évaluation du SAD et possibilités d'amélioration.....	84
6.2.	Bilan des observations et recommandations	86
6.3.	Expérimentations futures	90
CONCLUSION		92
RÉFÉRENCES.....		95
ANNEXES		100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Liste des avantages et inconvénients du CTM	11
Tableau 2.2 - Mesure de la performance globale d'une chaîne logistique	16
Tableau 2.3 - Méthodes de calcul des coûts de transport dans les modèles d'optimisation globale	19
Tableau 2.4 - Résumé de quelques modèles récents visant à minimiser les coûts logistiques totaux	23
Tableau 2.5 - Logiciels et solutions développés pour l'optimisation des opérations logistiques	33
Tableau 3.1 - Plan d'expérience	44
Tableau 4.1 - Taille du problème de transport (exemple)	62
Tableau 4.2 - Processus de réduction de la taille du graphe	62
Tableau 5.1 - Principales caractéristiques du problème résolu	70
Tableau 5.2 - Nombre de commandes à livrer pour chacun des scénarios simulés	71
Tableau 5.3 - Résultats obtenus pour les expérimentations $E1$ à $E4$	73
Tableau 5.4 - Phase optimale en fonction de la fréquence de livraison et de la durée de transit	77
Tableau 5.5 - Distance moyenne parcourue par commande pour les scénarios 4 et 13	79
Tableau 5.6 - Tableau de régression de C_{inv}	80
Tableau 5.7 - Tableau de régression de C_{transp}	80
Tableau 5.8 - Tableau de régression de C_{TOT}	81
Tableau 5.9 - Distance moyenne parcourue par commande pour les scénarios 4 et 23 à 26	83
Tableau 6.1 - Résumé des observations	87
Tableau 6.2 - Processus d'optimisation des opérations logistiques	88

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 - Localisation des usines et des centres de consolidation de Paccar (Amérique du Nord).....	5
Figure 2.1 - Schématisation du CTM.....	10
Figure 2.2 - Réseau de transport avec fréquences discrètes	27
Figure 2.3 - Exemple de graphe pour le modèle d'Eksioglu et al. (2005)	32
Figure 3.1 - Facteurs qui déterminent la complexité d'un système d'approvisionnement	39
Figure 3.2 - Approche de modélisation: combinaison de la simulation et de l'optimisation.....	40
Figure 3.3 - Schématisation des facteurs influençant le processus d'approvisionnement modélisé	43
Figure 3.4 - Plan factoriel pour l'étude des paramètres c , h et l_{moy}	45
Figure 4.1 - Structure du SAD	47
Figure 4.2 - Variation de la valeur des inventaires en main (exemple).....	51
Figure 4.3 - Exemple de graphe modélisant le réseau de transport.....	55
Figure 4.4 - Représentation de l'impact des liens unidirectionnels entre les commandes	60
Figure 4.5 - Illustration du graphe avant et après l'élimination des noeuds T (vue partielle).....	64
Figure 5.1 - Représentation géographique de la chaîne d'approvisionnement modélisée	68
Figure 5.2 - Coûts d'inventaires en fonction de la fréquence moyenne de livraison.....	72
Figure 5.3 - Coûts logistiques totaux en fonction de la fréquence moyenne de livraison.....	75
Figure 5.4 - Effet relatif des paramètres étudiés sur C_{TOT}	81
Figure 6.1 - SAD conçu pour guider les décisions tactiques et opérationnelles en ce qui concerne les opérations logistiques dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique	85

LISTE DES ANNEXES

Annexe A :	Liste des notations utilisées.....	101
Annexe B :	Exemple de SCGOT: <i>Paccar Transportation System</i>	105
Annexe C :	Diagramme relationnel de la BDD.....	107
Annexe D :	Phases de livraison utilisées.....	108

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ASN *Advanced Shipping Notice* (avis préalable d'expédition)

Document électronique par lequel le fournisseur avertit le client d'une expédition à venir et lui fournit des détails sur la nature et la quantité des marchandises.

– Source: <http://www.granddictionnaire.com/>

BDD Base de données

Ensemble structuré d'éléments d'information, généralement agencés sous forme de tables, dans lesquels les données sont organisées selon certains critères en vue de permettre leur exploitation.

– Source: <http://www.granddictionnaire.com/>

CPFR *Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment*

Le CPFR, développé par le VICS (*Voluntary Interindustry Commerce Standards*) en 1996, est un concept permettant de formaliser le processus global de prévision et de gestion de l'approvisionnement d'un distributeur auprès de ses fournisseurs. Le CPFR nécessite une forte collaboration des partenaires commerciaux impliqués au niveau des prévisions, des méthodes de réapprovisionnement, de la gestion des promotions, ainsi que de l'introduction de nouveaux produits.

– Source: <http://www.journaldunet.com/encyclopedie>

CTM *Collaborative Transportation Management*

Concept, dérivé du CPFR, visant à éliminer les inefficacités des activités de planification et d'exécution du transport en permettant, par la centralisation des opérations, la collaboration de plusieurs partenaires commerciaux.

– Source: Browning et White (2000); Sutherland (2003)

EOQ *Economic Order Quantity* (quantité économique de réapprovisionnement)

Quantité optimale [du point de vue de la gestion des stocks] qu'il convient de commander lorsque le stock est réduit à un niveau appelé « point de commande » et que la demande est considérée comme étant constante.

– Source: <http://www.granddictionnaire.com/>

FOB Free On Board

Les termes FOB sont les termes de vente qui indiquent où le transfert de titre est effectué entre l'acheteur et le vendeur. *FOB Origin* est une condition internationale de vente signifiant que le titre est émis au point d'origine du chargement et que l'acheteur est responsable des biens à partir de ce point.

– Source: <http://www.granddictionnaire.com/>

JAT Juste-à-temps

Méthode de gestion de la production en flux tendu (ou tiré) qui consiste à contrôler et à maîtriser le système de production en achetant ou en produisant la quantité requise au moment précis où on en a besoin, et ce, à chaque étape du processus.

– Source: <http://www.granddictionnaire.com/>

LTl Less-Than-Truckload (chargement partiel)

Chargement de marchandises qui est insuffisant quant à son poids ou à son volume pour l'application d'un tarif d'envoi par camion complet.

– Source : <http://www.granddictionnaire.com/>

MRP Material Requirements Planning (planification des besoins matières)

Méthode de planification et de gestion de l'ensemble des besoins de composants qui sont nécessaires à la réalisation du plan directeur de production à partir des nomenclatures et des états de stock de fabrication.

– Source : <http://www.granddictionnaire.com/>

NP-dur Problème NP-dur

Se dit d'un problème dont l'existence d'un algorithme polynomial pour construire une solution optimale est improbable.

– Source : http://fastnet.univ-brest.fr/~gire/TER/00_01/ordonnancement.html

PLNE Programme linéaire en nombres entiers

Recherche opérationnelle: programme linéaire dans lequel les variables à déterminer doivent être des nombres entiers.

PM Problème maître

PTS Paccar Transportation System

Système centralisé de gestion des opérations de transport (SCGOT) qui permet d'administrer l'acheminement des pièces des fournisseurs aux usines (logiciel développé par Paccar Inc en collaboration avec *Manugistics* (un 3PL)).

PTVC Problème de tournées de véhicules avec capacité

Problème consistant à minimiser la distance totale à parcourir pour livrer une quantité déterminée de marchandise (homogène ou hétérogène) d'un (ou de plusieurs) fournisseur(s) vers plusieurs clients, et ce, en formant des tournées. Un PTVC tient compte de la capacité, en volume ou en poids, des véhicules utilisés pour le transport.

PVC Problème du voyageur de commerce

Étant donné n points, le PVC consiste à déterminer le chemin de longueur minimale qui passe exactement une fois par chaque point et qui revient au point de départ.

– Source: http://fr.wikipedia.org/wiki/Probl%C3%A8me_du_voyageur_de_commerce

SAD Système d'aide à la décision

Système informatique intégré, conçu spécialement pour la prise de décision, et qui est destiné plus particulièrement aux dirigeants d'entreprise.

– Source: <http://www.granddictionnaire.com/>

SCGOT Système centralisé de gestion des opérations de transport

Système permettant de gérer, de façon centrale, l'approvisionnement de plusieurs centres de distributions ou usines. Un tel système assure le contrôle des flux informationnels et physiques entre les partenaires commerciaux impliqués.

SP Sous-problème

TI Technologies de l'information

Ensemble des matériels, logiciels et services utilisés pour la collecte, le traitement et la transmission de l'information.

– Source: <http://www.granddictionnaire.com/>

- TL *Truckload* (chargement complet)
 Chargement de marchandises dont le poids et le volume justifient l'application d'un tarif d'envoi par camion complet. Un chargement dont le poids est supérieur à 10 000 livres est généralement considéré comme un chargement complet.
 – Source : <http://www.granddictionnaire.com/>
- TMS *Transportation Management System* (système de gestion du transport)
 Système de gestion du transport: composant informatique d'un progiciel d'exécution de la chaîne logistique, qui permet de gérer et d'optimiser toutes les opérations relatives au transport de biens.
 – Source : <http://www.granddictionnaire.com/>
- VMI *Vendor Managed Inventory* (gestion partagée des approvisionnements)
 Entente de réapprovisionnement en vertu de laquelle les quantités à livrer au distributeur sont déterminées par le producteur en fonction des données relatives aux ventes et aux stocks, ainsi que des règles établies dans le cahier des charges.
 – Source: <http://www.granddictionnaire.com/>
- WMS *Warehouse Management System* (système de gestion d'entrepôt)
 Système de gestion d'entrepôt: composant informatique d'un progiciel d'exécution de la chaîne logistique, qui permet de gérer et d'optimiser toutes les opérations relatives à l'entreposage.
 – Source : <http://www.granddictionnaire.com/>
- 3PL *Third Party Logistics* (TPL) } prestataires de services logistiques
 4PL *Fourth Party Logistics* }
 Entreprise externe qui accomplit des activités logistiques pour le compte d'un industriel.
 – Source : <http://www.granddictionnaire.com/>

INTRODUCTION

Depuis l'avènement de la production allégée¹ (*lean manufacturing*), une technique de production développée par les Japonais il y a une cinquantaine d'années, la logistique est passée d'une fonction de support à une fonction stratégique. Aujourd'hui, l'optimisation globale de la chaîne logistique implique des enjeux majeurs, particulièrement pour les entreprises d'envergure internationale.

La philosophie à la base de la production allégée, c'est-à-dire l'élimination du gaspillage, a amené les gestionnaires logistiques à comprendre que pour assurer un flux adéquat de matières à travers la chaîne d'approvisionnement en utilisant un minimum de ressources, il est nécessaire de synchroniser les différents maillons de la chaîne. Pour ce faire, les gestionnaires doivent disposer d'une vue d'ensemble des acteurs, ainsi que des infrastructures physiques et informationnelles impliquées. En effet, pour être en mesure d'intégrer des systèmes d'information souvent développés indépendamment les uns des autres et pour tenir compte d'objectifs contradictoires comme, par exemple, la réduction des inventaires et des coûts de transport, il est nécessaire de tracer un portrait global du système. C'est pourquoi il est extrêmement complexe d'optimiser une chaîne logistique. D'ailleurs, les entreprises capables de développer des systèmes efficaces, robustes et bien adaptés à leurs besoins peuvent faire de leur chaîne logistique un véritable avantage concurrentiel.

Au cours des quinze dernières années, le développement rapide des technologies de l'information (TI) a ouvert de nouvelles portes aux entreprises désirant lier les différents maillons de leur chaîne d'approvisionnement. Au niveau de la gestion des inventaires, de nouvelles techniques comme le VMI (*Vendor Managed Inventory*) et le CPFR (*Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment*) ont vu le jour grâce à l'amélioration des communications entre les partenaires commerciaux. Pour ce qui est des opérations de transport, l'émergence des tierces parties logistiques (3PL & 4PL) et l'apparition du CTM (*Collaborative Transportation Management*) sont aussi liées à l'évolution des TI. En outre, les TI sont devenues la pierre angulaire de la synchronisation de la chaîne logistique.

¹ Méthode de gestion qui met l'accent sur la minimisation des ressources utilisées pour la production de grandes quantités de biens ou de services de bonne qualité et à un moindre coût.

– Source: <http://www.granddictionnaire.com/>.

L'industrie automobile a été la pionnière en ce qui concerne le développement de la production allégée. D'ailleurs, les faibles marges de profit, les besoins de flexibilité et de diversité, la surcapacité de production, la concurrence féroce, ainsi que l'instabilité du marché sont de nombreuses raisons qui expliquent le virage des assembleurs automobile vers cette technique de production. De plus, les récents développements des TI ont permis aux assembleurs d'étendre les principes de la production allégée en amont de leur chaîne d'approvisionnement. En effet, pour être en mesure de livrer des produits fabriqués sur demande tout en respectant de courts délais de livraison, ces entreprises portent une attention particulière à leur chaîne logistique.

Paccar Inc, une multinationale spécialisée dans l'assemblage de camions, est un exemple d'entreprise qui place l'optimisation des opérations logistiques au cœur de ses projets d'amélioration. Actuellement, cette entreprise insiste sur deux points principaux pour réduire ses coûts d'opération: l'augmentation du taux de rotation des stocks, ainsi que la réduction des coûts de transport liés à l'approvisionnement. D'une part, Paccar applique beaucoup de pression pour que ses usines réduisent leurs inventaires. D'autre part, l'entreprise a entamé l'implantation, en 2005, d'un nouveau système de gestion des opérations de transport, nommé PTS (*Paccar Transportation System*). Contrairement à l'ancien système, PTS permet de gérer de façon centrale l'approvisionnement des six usines nord-américaines de Paccar. Ainsi, la multinationale espère réduire ses coûts de transport en profitant des avantages du CTM.

Tout comme Paccar, de nombreuses entreprises développent des outils destinés à l'optimisation d'une opération logistique en particulier. Par contre, rares sont celles qui visent une optimisation globale de leurs activités logistiques, ce qui va à l'encontre des principes de la production allégée. Par exemple, en implantant un système centralisé de gestion des opérations de transport (SCGOT), une entreprise désire d'abord et avant tout réduire les coûts de transport encourus pour approvisionner ses centres de distributions et/ou usines. Toutefois, l'implantation d'un tel système aura des impacts, entre autres, sur les niveaux d'inventaires, ainsi que sur les coûts de commande. Pour quantifier ces impacts et être en mesure d'optimiser globalement le système, il est nécessaire de modéliser les opérations logistiques. Cette modélisation, souvent très complexe, exige l'intégration de plusieurs activités logistiques dans un seul modèle. C'est pourquoi les entreprises préfèrent généralement s'attaquer à une activité logistique à la fois.

Dans ce mémoire, il est question du problème de l'optimisation globale d'une chaîne logistique. Plus particulièrement, les chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique comprenant de multiples fournisseurs et usines sont considérées. En fait, deux objectifs principaux sont poursuivis. Le premier objectif vise le développement d'un modèle mathématique intégrant les principales activités logistiques d'une chaîne d'approvisionnement. Plus particulièrement, ce modèle doit couvrir les activités logistiques liant un donneur d'ordres à ses fournisseurs et permettre de minimiser les coûts encourus par ce donneur d'ordres. Afin de développer un modèle ayant des applications pratiques, la chaîne d'approvisionnement des usines nord-américaines de Paccar sera modélisée. En effet, cette entreprise s'avère un terrain d'expérimentation idéal pour l'étude de l'optimisation globale des opérations logistiques.

Le second objectif consiste à intégrer ce modèle dans un système d'aide à la décision (SAD) visant à étudier le comportement d'un système logistique en fonction de la variation de divers paramètres et variables de décisions. Ce SAD permettra de tester diverses hypothèses, dont la suivante:

H1 Dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, une gestion centralisée de l'approvisionnement de plusieurs centres de distribution et/ou usines permet de réduire les coûts logistiques totaux de façon considérable, en comparaison à une gestion décentralisée.

En effet, une gestion centralisée de l'approvisionnement de plusieurs centres de distribution et/ou usines devrait permettre de profiter davantage des économies liées aux opérations de consolidation et de transbordement. De plus, il devrait aussi être possible de réduire les inventaires en augmentant les fréquences de livraison. Toutefois, les impacts sur les coûts logistiques totaux sont difficiles à estimer. C'est pourquoi l'hypothèse *H1* a été émise. Par ailleurs, il est à noter que d'autres hypothèses seront testées à l'aide du SAD. Ces hypothèses seront émises à la section 3.3, après avoir présenté les variables de décision et paramètres à l'étude.

Ce mémoire est divisé comme suit. D'abord, le contexte opérationnel des usines nord-américaines de Paccar sera exposé, afin d'analyser brièvement la chaîne d'approvisionnement qui sera modélisée. Ensuite, une revue bibliographique sera réalisée pour effectuer un survol de la recherche scientifique dans deux domaines précis, soit la centralisation de la gestion des

opérations d'approvisionnement, ainsi que la modélisation des systèmes logistiques. Par la suite, il sera question de la méthodologie de recherche employée. Dans cette section, le problème sera défini, l'approche de modélisation sera expliquée, les variables de décision et paramètres à l'étude seront déterminés et le plan d'expérience sera élaboré. Puis, le SAD développé sera exposé en détail. Cette section expliquera la structure du SAD, détaillera le modèle mathématique développé et traitera brièvement de la programmation du SAD. Ensuite, les résultats des expérimentations seront présentés. Ces résultats seront analysés en fonction des différents objectifs et hypothèses de recherche. Finalement, plusieurs recommandations concernant l'optimisation globale d'une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique seront émises.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE OPÉRATIONNEL DE PACCAR

Avant d'entamer le volet recherche de ce mémoire, il est important de décrire brièvement le contexte opérationnel des usines nord-américaines de Paccar. En effet, puisque cette entreprise s'avère le terrain d'expérimentation du projet de recherche, cette section permettra de situer le projet dans son contexte et d'exposer les grandes lignes du problème.

Paccar Inc est une entreprise d'envergure internationale qui assemble des véhicules lourds (camions de classes 6, 7 et 8). En Amérique du Nord, Paccar possède six usines d'assemblage situées au Canada, aux États-Unis, ainsi qu'au Mexique (cf. figure 1.1).

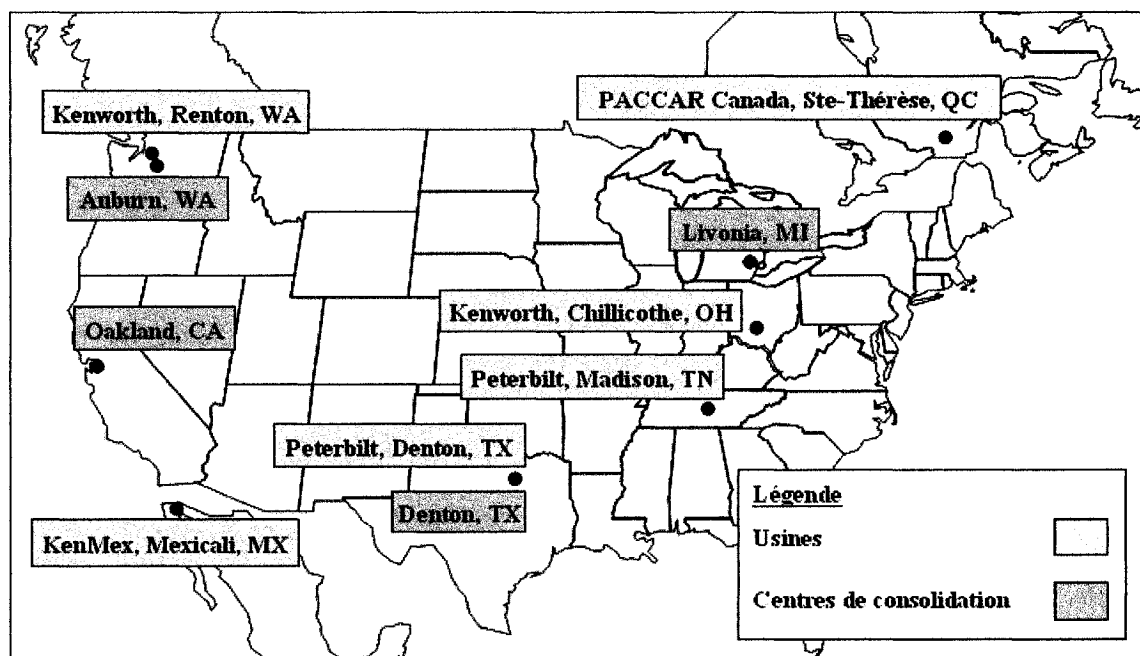


Figure 1.1 - Localisation des usines et des centres de consolidation de Paccar (Amérique du Nord)

1.1. Dispersion géographique des fournisseurs

La dispersion géographique des centaines de fournisseurs nord-américains avec lesquels Paccar fait affaire complexifie les opérations logistiques d'approvisionnement. En effet, ces fournisseurs sont répartis un peu partout aux États-Unis, ainsi qu'au Nord du Mexique et au Canada (Sud-Ouest et Sud-Est). Par conséquent, les usines doivent souvent composer avec des délais de livraison considérables, ce qui représente un défi de taille puisque l'entreprise

s'approvisionne en juste-à-temps. Il est à noter que toutes les pièces sont acheminées aux usines par camion, à l'exception de certaines commandes expédiées en urgence lorsqu'il y a des pièces manquantes (*backorders*).

L'usine canadienne de Paccar, située à Ste-Thérèse au Québec, est particulièrement affectée par l'éloignement de ses fournisseurs. En effet, plus de 97% de ses quelques 370 fournisseurs sont situés à l'extérieur du Québec et de l'Ontario. Pour certains fournisseurs, la durée de transit peut atteindre sept jours. Ces importants délais de livraison limitent la flexibilité au niveau des fréquences de livraison et, en général, au niveau des opérations de juste-à-temps, car le temps de réaction face aux imprévus est plus long.

1.2. Gestion des inventaires

À titre d'exemple, l'usine de Ste-Thérèse gère, en mai 2006, près de 11 000 pièces très diversifiées, tant au niveau des requis que du volume, du poids et de la valeur des pièces. Cette hétérogénéité a forcé l'entreprise à créer des groupes de pièces et à développer des systèmes de gestion adaptés à ces différents groupes. En fait, les usines disposent de quatre systèmes distincts pour la gestion de leurs pièces:

1. approvisionnement synchrone pour les pièces majeures (moteurs, transmissions, essieux, pneus, réservoirs à essence, radiateurs, suspensions, *etc.*), c'est-à-dire que les pièces sont envoyées, par les fournisseurs, en fonction de la séquence d'assemblage ;
2. un système kanban pour les pièces de quincaillerie (boulons, écrous, vis, *etc.*) ;
3. un système de type kanban pour les pièces de valeur moyenne ayant une utilisation élevée² ;
4. un système de type MRP pour les pièces à faible utilisation.

Depuis quelques années, les dirigeants de l'entreprise appliquent beaucoup de pression au niveau des usines pour que celles-ci réduisent leurs inventaires. En effet, l'approvisionnement synchrone et les systèmes kanban ont permis de réduire considérablement les inventaires. De

² Tous les fournisseurs importants participent à un programme d'approvisionnement de type kanban, nommé *système logistique*. Les pièces gérées avec ce système sont manutentionnées dans des contenants de plastique bleus réutilisables portant des étiquettes avec codes à barres. Lorsqu'un contenant est vidé, un employé effectue, à l'aide d'un scanneur, la lecture du code à barres inscrit sur le contenant, ce qui génère automatiquement une commande dans le système. Il est à noter que ce type d'approvisionnement n'est pas un système kanban « pur », étant donné que les commandes sont validées de façon hebdomadaire en fonction des requis à venir.

plus, Paccar a adopté une politique interne obligeant les usines à réduire à six pieds la hauteur des étagères d'entreposage le long de la ligne d'assemblage. Cependant, la distance séparant les fournisseurs des usines représente un obstacle de taille à la réduction des inventaires. En effet, il est important de noter que la marchandise achetée aux fournisseurs appartient aux usines dès qu'elle quitte le quai d'expédition du fournisseur (*FOB Origin*). Par conséquent, les inventaires en transit doivent être pris en compte.

Le taux de rotation des stocks est un des principaux indicateurs de performance utilisés par Paccar pour comparer la performance de ses usines. Par contre, celles-ci ne disposent d'aucun outil particulier pour évaluer l'impact, au niveau des coûts logistiques totaux, de la réduction de leurs inventaires. En réalité, Paccar estime simplement que les économies annuelles réalisées en réduisant l'inventaire d'une pièce équivalent à 10% de la valeur totale des inventaires éliminés.

1.3. Gestion des opérations de transport

Avant l'implantation du système PTS³, chaque usine de Paccar gère ses opérations d'approvisionnement de façon indépendante. Pour réduire leurs coûts de transport, les usines disposaient de quatre centres de consolidation (cf. figure 1.1), situés dans les régions couvrant les principales agglomérations de fournisseurs. Toutefois, le manque de communication entre les usines, ainsi que l'absence d'un système d'information approprié à la gestion complexe des opérations logistiques de l'entreprise limitaient l'optimisation des opérations de transport.

Il y a quelques années, les dirigeants de l'entreprise ont pris la décision de centraliser l'approvisionnement des usines dans le but premier de réduire les coûts de transport, ce qui a mené au développement du système PTS (cf. annexe B). En fait, la gestion centralisée devrait permettre à l'entreprise d'effectuer d'importantes économies d'échelle et lui fournir un pouvoir accru de négociation auprès des transporteurs (Arnold 1999). En plus de réduire ses coûts de transport, Paccar espère, par l'implantation du système PTS, atteindre les objectifs suivants:

- améliorer la communication et les échanges d'information avec ses fournisseurs (grâce à un système d'information centralisé – en l'occurrence le système PTS) ;
- augmenter la rotation des stocks ;
- améliorer le suivi des pièces en transit.

³ PTS (*Paccar Transportation System*) est un système centralisé de gestion des opérations de transport.

En analysant ces objectifs, il est possible de constater que le système PTS est basé sur la technique du CTM (*Collaborative Transportation Management*), qui est décrite en détail dans la revue bibliographique (cf. section 2.1). Étant donné que le CTM est un sujet qui a n'été que très brièvement couvert dans la littérature, il s'avère difficile d'estimer les impacts, au niveau des coûts logistiques totaux, de l'implantation d'un système centralisé de gestion des opérations de transport.

Bref, comme il est possible de le constater, Paccar investit beaucoup d'argent pour l'optimisation de ses opérations logistiques, sans toutefois connaître l'impact réel de ses investissements sur ses coûts logistiques totaux. En effet, de nombreux paramètres doivent être étudiés pour être en mesure de déterminer le juste milieu entre l'augmentation du niveau de service pourvu aux usines approvisionnées, du point de vue de l'approvisionnement en juste-à-temps, et la réduction des coûts logistiques totaux. D'ailleurs, c'est à ce niveau qu'un modèle est très utile. En développant un modèle mathématique permettant de simuler les activités d'approvisionnement des usines de Paccar, il sera possible d'étudier l'impact de divers paramètres comme, par exemple, les fréquences de livraison, sur les coûts logistiques totaux.

Après avoir décrit le contexte opérationnel des usines nord-américaines de Paccar, il est maintenant possible d'effectuer une revue bibliographique de certains domaines de recherche liés aux activités logistiques de l'entreprise.

CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette revue bibliographique a pour but d'analyser le développement scientifique dans le domaine de l'optimisation globale d'une chaîne d'approvisionnement. Deux thèmes principaux seront couverts: la centralisation de la gestion des opérations logistiques, pour cerner toutes les implications des SCGOT, et la modélisation des systèmes logistiques, afin d'analyser comment les activités logistiques sont modélisées dans la littérature.

2.1. Centralisation de la gestion des opérations logistiques

Le premier aspect à couvrir dans cette revue de littérature est la centralisation de la gestion des opérations logistiques. Pour être en mesure de développer un outil d'aide à la décision visant à optimiser de façon globale les opérations logistiques, il est important de comprendre les effets de cette centralisation sur la performance du système d'approvisionnement.

La production sur commande force les fabricants à raccourcir leurs fenêtres de planification et à réduire leurs inventaires, ce qui augmente la pression sur les différents acteurs impliqués dans la chaîne logistique (Tyan, Wang et Du 2003; CTM Sub-Committee 2004). L'approvisionnement en juste-à-temps doit donc être poussé à la limite. Cependant, dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, ceci demande une synchronisation. C'est à ce niveau que le CTM (*Collaborative Transportation Management*) entre en ligne de compte.

L'apparition du CTM au début du nouveau millénaire a modifié la vision qu'avaient les logisticiens de la gestion et de l'optimisation des opérations de transport. Par définition, le CTM a pour but d'éliminer les inefficacités des activités de planification et d'exécution du transport en permettant, par la centralisation des opérations, la collaboration de plusieurs partenaires commerciaux (Browning et White 2000; Sutherland 2003). Cette collaboration entre les fournisseurs, les transporteurs et les donneurs d'ordres (fabricants) permet de synchroniser la chaîne d'approvisionnement (Esper et Williams 2003). D'ailleurs, ces partenaires coopèrent à plusieurs niveaux (CTM Sub-Committee 2004):

- échange d'informations (prévisions, capacités, plans stratégiques, *etc.*) ;
- identification et résolution commune des exceptions ;
- partage des risques et des bénéfices.

Toutefois, étant donné que la culture managériale nord-américaine est peu propice à la collaboration interentreprises, l'implantation du CTM représente un défi de taille. Pour que le CTM soit une réussite, les échanges entre les partenaires commerciaux impliqués doivent être basés sur la confiance et les bénéfices encourus doivent être partagés (Esper et Williams 2003), ce qui va à l'encontre des principes administratifs habituels des multinationales américaines.

2.1.1. Raison d'être, éléments clés et avantages du CTM

Afin de mettre en évidence les principes directeurs du CTM, la figure 2.1 schématise le fonctionnement du CTM:

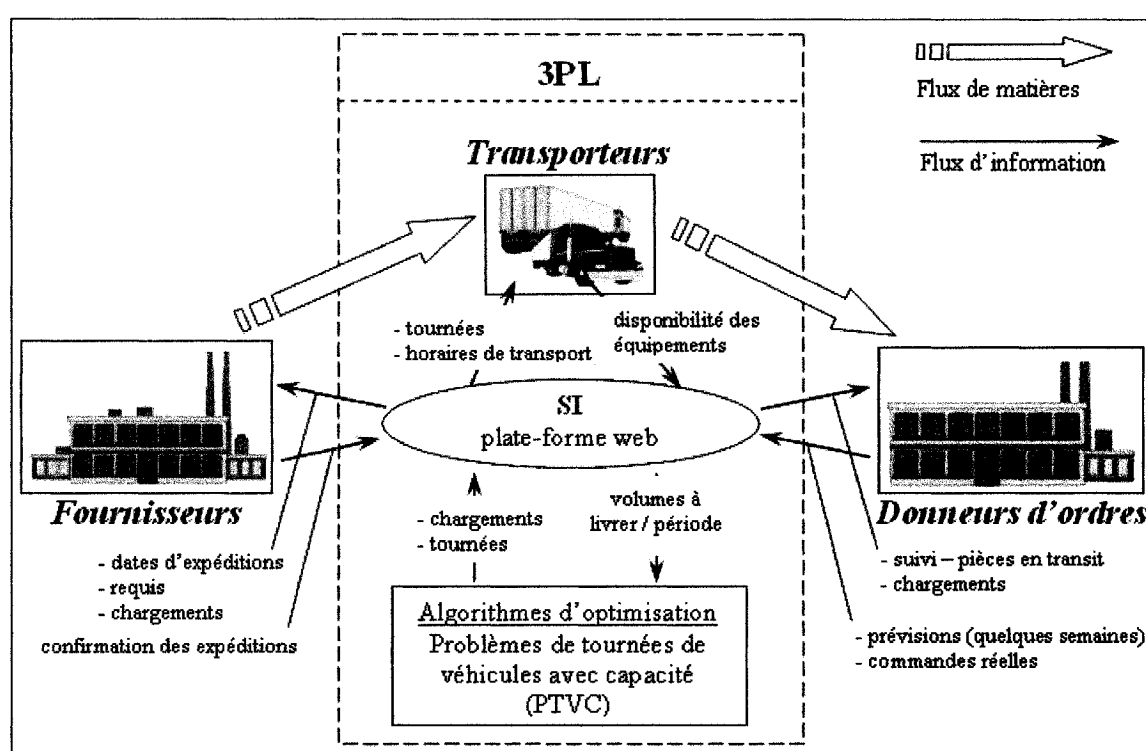


Figure 2.1 - Schématisation du CTM

La figure 2.1 permet entre autres d'illustrer l'apport des tierces parties logistiques (3PL) pour le CTM. En effet, le mandat du 3PL est de lier les partenaires commerciaux impliqués, c'est-à-dire de rendre la collaboration possible. Pour ce faire, un 3PL doit posséder trois éléments clés (Esper et Williams 2003):

1. un important réseau de transporteurs ;

2. un système d'information, de préférence basé sur le web, permettant l'échange d'information sous une seule et unique plate-forme ;
3. de puissants algorithmes d'optimisation pour résoudre les problèmes de tournées de véhicules.

Pour bien cerner les implications du CTM, il est important d'en étudier les avantages et inconvénients. Ceux-ci sont détaillés dans le tableau 2.1 (Browning et White 2000). Somme toute, en plus de la réduction des coûts de transport et des inventaires, le CTM peut améliorer le niveau de service pourvu aux usines approvisionnées, encourager la communication entre les partenaires commerciaux impliqués et améliorer la réactivité de la chaîne logistique.

Tableau 2.1 - Liste des avantages et inconvénients du CTM

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -réduction des inventaires ; -réduction des coûts de transport: <ul style="list-style-type: none"> -augmentation du volume utilisé dans les remorques ; -réduction des parcours à vide ; -optimisation des tournées de véhicule ; -réduction de l'attente (temps de séjour) lors du chargement/déchargement (<i>dwel time</i>) ; -meilleure gestion des urgences ; -prévisions des expéditions plus précises ; -optimisation des opérations de consolidation et de transbordement ; -amélioration de la qualité du service (réduction du temps de réponse et des retards, amélioration du suivi des commandes et des pièces en transit, etc.) ; -réduction des coûts administratifs (simplification du processus de facturation, réduction des erreurs, etc.) ; -meilleur contrôle des opérations (centralisation) ; -partage des risques entre les partenaires (exemple: investissement conjoint pour certaines infrastructures) ; -meilleure réaction de la chaîne logistique face aux variations de la demande. 	<ul style="list-style-type: none"> -coûts élevés pour le développement des infrastructures de communication ; -culture de collaboration difficile à établir ; -complexité d'implantation (plusieurs partenaires commerciaux à synchroniser) ; -réseau d'envergure nécessaire.

Étant donné la nature du SAD à développer dans ce mémoire, une attention particulière sera portée aux deux avantages suivants:

1. réduction des coûts de transport ;
2. augmentation de la rotation des stocks (ou réduction des inventaires).

Deux facteurs principaux font en sorte que le CTM réduit les coûts de transport. Premièrement, dans le CTM, les transporteurs sont mieux intégrés à la chaîne logistique (CTM Sub-Committee 2004). Au niveau stratégique, ils participent à la création d'un plan commun de gestion des opérations logistiques. Au niveau tactique, ils reçoivent les prévisions des donneurs d'ordres, établissent leurs besoins en équipement et participent à la résolution des exceptions. Enfin, au niveau opérationnel, ils participent à la génération des expéditions, facilitent le suivi des pièces en transit et reçoivent leurs paiements de façon électronique (Tyan, Wang et Du 2003). Bref, les transporteurs sont impliqués à tous les niveaux de gestion des opérations de transport. Deuxièmement, le fait de gérer un volume important de pièces de façon centrale en utilisant de puissants algorithmes d'optimisation pour déterminer les expéditions à réaliser permet de remplir davantage les remorques et de minimiser les distances à parcourir (CTM Sub-Committee 2003). En somme, l'intégration des transporteurs à la chaîne logistique et la gestion centrale des commandes sont les deux facteurs principaux qui expliquent la réduction des coûts de transport possible grâce au CTM.

Pour ce qui est de l'impact du CTM au niveau des inventaires, la littérature n'est pas aussi claire. En fait, les chercheurs soulignent que les inventaires peuvent être réduits puisque le CTM améliore la visibilité à travers la chaîne logistique et, par le fait même, les partenaires impliqués sont mieux synchronisés (Tyan, Wang et Du 2003; Esper et Williams 2003). Toutefois, les chercheurs ne traitent pratiquement pas des avantages de la consolidation. En effet, étant donné que le CTM permet de gérer les commandes de plusieurs donneurs d'ordres de façon globale, il est parfois possible d'augmenter les fréquences de livraison grâce à des opérations de consolidation et, ainsi, de réduire les inventaires. Par ailleurs, contrairement à la réduction des coûts de transport, l'augmentation de la rotation des stocks est un phénomène qui a été peu observé en pratique. Le *CTM Sub-Committee* cite l'exemple de *Best Buy Pilot* et *AutoZone*, deux entreprises qui ont réduits leurs inventaires de 50% grâce au CTM (CTM Sub-Committee 2003). Par contre, aucun autre exemple n'a été rencontré dans cette revue bibliographique. Ce manque d'exemples concrets et d'explications scientifiques montre que les effets du CTM sur la réduction des inventaires sont peu documentés et que les chercheurs n'ont pas encore développé de méthodes scientifiques pour calculer les impacts de la centralisation des décisions sur les inventaires présents dans une chaîne logistique.

2.1.2. Le CTM et les technologies de l'information

Towill et McCullen (1999) ont énoncé quatre principes pour que les entreprises améliorent la synchronisation de leur chaîne d'approvisionnement. Ces principes sont les suivants:

1. implantation de systèmes informatiques robustes pour le contrôle des processus ;
2. réduction des délais au niveau des flux de matière et d'information ;
3. échange rapide et simple d'informations précises entre les partenaires commerciaux ;
4. réduction des interfaces fonctionnelles (élimination des échelons de la chaîne).

Comme il est possible de le constater, trois de ces quatre principes concernent directement les TI. Il n'est donc pas surprenant que le CTM soit aussi dépendant des TI. En fait, celles-ci jouent deux rôles essentiels pour le CTM. D'une part, elles rendent la collaboration possible (CTM Sub-Committee 2003; Tyan, Wang et Du 2003). D'autre part, elles servent de support à la collaboration car elles réduisent les risques et les coûts des transactions entre les partenaires impliqués (Esper et Williams 2003). Un 3PL ayant comme mandat de synchroniser les différents acteurs du CTM (cf. figure 2.1) doit donc posséder des outils informatiques puissants et flexibles.

Plus précisément, au niveau des technologies utilisées, il est essentiel de bâtir un système d'information qui soit accessible à tous les partenaires commerciaux impliqués dans le CTM, pour éviter que certains d'entre eux soient gênés par leurs limites technologiques (Browning et White 2000). C'est pourquoi les plates-formes développées sont généralement basées sur le web. Par exemple, une telle plate-forme permet un suivi des commandes en temps réel puisque les acteurs concernés mettent à jour l'état de la commande ou de l'expédition dès qu'un point de contrôle est atteint (Tyan, Wang et Du 2003). De plus, l'accès à l'information à un coût modeste facilite le développement de la culture de collaboration qui est essentielle à la réussite du CTM à long terme.

Bref, étant donné le rôle que jouent les TI pour l'intégration de la chaîne logistique, elles seront au cœur de la conception du SAD qui sera développé dans le cadre de ce mémoire.

2.1.3. Éloignement des partenaires commerciaux impliqués

Pour terminer cette première section de la revue bibliographique, il s'avère intéressant de traiter brièvement de la dispersion géographique des partenaires commerciaux impliqués dans un

SCGOT. En général, une usine très éloignée de ses fournisseurs devrait encourir des coûts logistiques plus élevés qu'une usine située près de ses fournisseurs. Par exemple, les délais de livraison élevés limitent la flexibilité au niveau des fréquences de livraison, ce qui peut se traduire par une augmentation des inventaires. De plus, Li, Kumar et Lim (2002) soulignent que l'éloignement entre un donneur d'ordres et ses fournisseurs augmente l'incertitude des flux d'information et de matière, ainsi que les coûts d'approvisionnement.

Bien que plusieurs modèles visant la gestion des opérations de transport dans les chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique aient été développés (Crainic 2002), aucune étude n'a été effectuée pour quantifier les impacts de la dispersion géographique des fournisseurs et des usines sur les coûts logistiques totaux.

2.2. Modèles logistiques globaux

Comme il a été mentionné, ce mémoire vise le développement d'un outil d'aide à la décision permettant d'optimiser, de façon globale, les opérations logistiques liées à l'approvisionnement d'un donneur d'ordres auprès de ses fournisseurs. En étudiant les articles traitant des modèles logistiques globaux, il sera donc possible de déterminer la structure et les principaux éléments du modèle mathématique à développer.

2.2.1. Intégration et modélisation d'une chaîne logistique

Dans un article traitant de la conception et de la modélisation de systèmes logistiques globaux, Goetschalckx et al. (2002) affirment que minimiser le coût total du système est devenu l'objectif standard en logistique. Pour atteindre cet objectif, les donneurs d'ordres visent une meilleure intégration de leur chaîne logistique. Cette intégration doit être réalisée tant au niveau des activités logistiques à prendre en compte (transport, contrôle des inventaires, gestion des commandes, *etc.*), qu'au niveau des partenaires commerciaux impliqués (Vidal et Goetschalckx 1997). En fait, une chaîne logistique bien intégrée permet de diminuer les stocks en amont et en aval de la chaîne, en plus de réduire les coûts associés aux flux de matières et d'information (Barut, Faisst et Kanet 2002). Par ailleurs, cette intégration permet d'accroître la flexibilité de la chaîne, c'est-à-dire qu'elle donne la chance d'anticiper les changements du marché et, du même coup, de répondre plus rapidement aux demandes des consommateurs (Slats, Bhola, Evers et Dijkhuizen 1995).

Lier adéquatement les différents maillons d'une chaîne logistique n'est toutefois pas une tâche élémentaire. Li et al. (2002) suggèrent que pour être en mesure de pousser davantage l'intégration d'un système d'approvisionnement, il est nécessaire de pouvoir le modéliser. La modélisation permet, d'une part, de comprendre la structure du système et, d'autre part, d'évaluer l'impact de différents facteurs sur la performance globale de la chaîne. Cependant, Goetschalckx et al. (2002) soulignent qu'il n'existe pas, présentement, de méthodologie pour guider la conception de chaînes d'approvisionnement supportant la vision globale et à long terme des entreprises. Donc, même si les chercheurs sont conscients que l'intégration d'une chaîne d'approvisionnement passe par l'optimisation globale du système, les outils de modélisation disponibles actuellement ne sont pas assez développés pour supporter pleinement ce concept. Néanmoins, il existe plusieurs modèles visant une optimisation globale des activités logistiques qui offrent des approches de modélisation intéressantes. Avant de présenter les modèles pertinents pour ce mémoire, il s'avère intéressant d'effectuer un bref survol des indicateurs nécessaires pour évaluer la performance globale d'une chaîne logistique.

2.2.2. Mesures de performance

Pour évaluer globalement la performance d'un système logistique, il faut mesurer des indicateurs qui représentent les différentes dimensions de ce système. Ces dernières années, plusieurs chercheurs ont tenté d'identifier ces dimensions et de déterminer les meilleurs indicateurs pour les évaluer. Le tableau 2.2 présente certains résultats de leurs recherches.

Comme il est possible de le constater, il existe de nombreux indicateurs qui peuvent être utilisés pour mesurer la performance d'une chaîne d'approvisionnement. Même si certains indicateurs reviennent fréquemment dans la littérature (inventaires en main, fréquence des ruptures de stock, coûts divers, performance des livraisons, *etc.*), les indicateurs à utiliser sont difficiles à cerner, et ce, pour deux raisons (Beamon 1999). Premièrement, les objets à prendre en compte (partenaires commerciaux et activités logistiques à inclure dans le modèle, produits à traiter, *etc.*) doivent permettre de tracer un portrait global du système sans toutefois être trop nombreux. Deuxièmement, l'évaluation des indicateurs de performance n'est pas toujours évidente, surtout au niveau des indicateurs qualitatifs.

En plus d'avoir de la difficulté à choisir les indicateurs appropriés, les chercheurs peinent à évaluer la performance globale de la chaîne logistique puisqu'ils sont confrontés à un problème

de taille, c'est-à-dire combiner les différentes dimensions à évaluer sous un seul objectif. C'est pourquoi la grande majorité des modèles logistiques globaux développés jusqu'à maintenant tiennent seulement compte de mesures quantitatives qui peuvent être traduites par un objectif monocritère. En général, les chercheurs développent des modèles visant à minimiser les coûts logistiques totaux. Par conséquent, les indicateurs de performance comme la flexibilité de la chaîne logistique et la performance des livraisons sont rarement inclus dans les modèles. Pour ces différentes raisons, ce projet de recherche sera uniquement concentré sur la modélisation des coûts logistiques.

Tableau 2.2 - Mesure de la performance globale d'une chaîne logistique

Article	Dimensions évaluées	Indicateurs de performance utilisés
Beamon (1998)	coûts service pourvu au client réactivité flexibilité	coûts, profits, inventaires en main,... % de commandes remplies,... fréquence des ruptures de stock,... disponibilité/capacité du système,...
Dong et O'Brien (1999)	profitabilité flexibilité fiabilité élimination du gaspillage	profits délai d'approvisionnement (réactivité) ponctualité des livraisons inventaires en main
Van Landeghem et Persoons (2001) & Lai et al. (2002)*	performance des livraisons flexibilité coûts actifs	% de commandes parfaites, livraisons à temps,... délai d'approvisionnement,... coûts logistiques totaux, production à valeur ajoutée,... inventaires en main, rotation des actifs,...
Chan (2003)	coûts utilisation des ressources qualité flexibilité visibilité innovation	transport, manutention, entreposage,... ressources humaines et matérielles,... % de commandes en retard,... réactivité vs fluctuation du volume à traiter,... visibilité au niveau des commandes,... nouveaux équipements, nouvelles techniques,...
Rafele (2004)	actifs personnel inventaires/disponibilité flexibilité service pourvu au client performance des livraisons gestion des commandes information via Internet	productivité des équipements, utilisation de l'espace,... efficacité du personnel,... inventaires en main, fréquence des ruptures de stock,... % des commandes urgentes/spéciales remplies % de commandes parfaites, livraisons à temps,... fréquences des livraisons, conditions de livraison,... gestion des documents,... facilité à commander via un site Internet,...

*Adaptation des indicateurs utilisés dans le modèle SCOR (*Supply Chain Operations Reference*), développé par le *Supply Chain Council*.

2.2.3. Modélisation des coûts logistiques

Avant d'étudier en détail les modèles existants, il est important de comprendre comment les coûts liés aux opérations logistiques sont modélisés dans la littérature. En logistique, les coûts les plus importants sont, sans contredit, les coûts de transport et d'inventaires. En effet, les inventaires peuvent représenter 25% des actifs totaux d'une entreprise (Volmann, Berry et Whybark (1997), cité dans Lutz, Löedding et Wiendahl (2003), p.218). Puis, au niveau des coûts de transport, les statistiques sont tout aussi évocatrices. Selon le *CTM Sub-Committee* (2004), les activités de transport consomment environ 5,5% des revenus des entreprises américaines. Plus particulièrement, Swenseth et Godfrey (2002) soulignent que le transport représente plus de 50% des coûts logistiques d'un produit. Les trois sections suivantes présentent en détail comment les coûts logistiques sont modélisés dans la littérature, en particulier les coûts d'inventaires et de transport.

2.2.3.1. Coûts liés aux inventaires

Dans la littérature, les coûts d'inventaires (C_{inv}) ont été étudiés en détail. Les chercheurs ont divisé les coûts encourus par le maintien d'inventaires en quatre éléments distincts (Chan et Qi 2003; Fazel 1997):

1. capital indisponible ;
2. stockage des pièces: manutention, espace, équipements et installations requis ;
3. risques (obsolescence, dommages et bris,...) ;
4. taxes et assurances payées pour les stocks en main.

Actuellement, il n'existe aucun modèle permettant de calculer avec exactitude les économies liées à la réduction des inventaires, puisque les coûts liés au stockage des pièces et aux risques sont difficiles à estimer. Pour simplifier les calculs, la grande majorité des chercheurs combinent tous ces éléments sous un même coefficient, h_i , représentant les coûts encourus pour maintenir en inventaire une unité de la pièce i durant une période donnée (par exemple, $[h_i] = \$/\text{unité}/\text{jour}$). Ainsi, les coûts d'inventaires sont proportionnels à la quantité stockée (I_i) et à la durée d_{S_i} de stockage (Zhao, Wang, Lai et Xia 2004). Le coût total lié aux inventaires (C_{inv}) peut donc être représenté par la relation suivante:

$$C_{inv} = \sum_{\forall i} h_i I_i d_{S_i} \quad (2.1)$$

La constante h_i est généralement estimée en fonction des coûts engendrés par le capital indisponible, puisque cet élément est le manque à gagner le plus important parmi les quatre éléments énumérés plus haut. Puis, pour calculer les inventaires en main (I_i), il faut tenir compte des pièces en transit, des pièces en stock, des encours de production et des produits finis (Li et O'Brien 1999). En général, dans les modèles d'optimisation, I_i est une variable.

En ce qui concerne les modèles basés sur la quantité économique de commande (cf. section 2.2.4), les coûts liés aux inventaires en main pour une pièce i sont très simples à calculer:

$$C_{inv_i} = Q_i h_i / 2 \quad (2.2)$$

Dans de tels modèles, la demande est considérée comme étant constante et la variable à déterminer est la quantité fixe de commande (Q_i). Ainsi, $[h_i] = \$/\text{unité/période}$ et $I_i = Q_i$. Puisque la demande est constante durant la période (une période représente la durée entre deux commandes), une pièce reste en moyenne $\frac{1}{2}$ période en inventaire (Zhao, Wang, Lai et Xia 2004). C'est pourquoi la durée d_{s_i} de stockage est égale à $\frac{1}{2}$ période.

D'un autre côté, dans les modèles pour lesquels la demande n'est pas constante, les coûts d'inventaires sont plus complexes à calculer. En effet, il s'agit de déterminer les niveaux d'inventaires à chaque période t considérée⁴, de façon à minimiser les coûts totaux. En général, les auteurs considèrent que le niveau d'inventaires à la fin d'une période (I_{it}) est la quantité moyenne d'unités qui ont été stockées durant la période t . Selon cette hypothèse, le coût des inventaires liés à la pièce i durant l'horizon de planification est:

$$C_{inv_i} = \sum_t \sum_i h_i I_{it} \quad (2.3)$$

2.2.3.2. Coûts de transport

Pour ce qui est des coûts de transport (C_{transp}), ceux-ci sont généralement plus complexes à estimer que les coûts d'inventaires. Comme l'affirment Zhao et al. (2004), ces coûts sont composés de coûts fixes (c_f) et de coûts variables (c_v). Par contre, pour une entreprise qui ne possède pas sa propre flotte de véhicules, les coûts fixes sont inclus dans les taux offerts par les transporteurs. Ces taux sont basés sur le poids du chargement et la distance à parcourir

⁴ Pour ce type de modèle, l'horizon de planification est divisé en un nombre fixe de périodes t .

(Swenseth et Godfrey 2002). Par contre, ils dépendent également du prix de l'essence, du type de chargement (TL ou LTL), des techniques de transport employées (transport direct, opérations de consolidation et de transbordement, *etc.*) et des contraintes temporelles à respecter, comme les délais de livraison et les fenêtres de temps.

Le tableau 2.3 résume les principales méthodes développées par les chercheurs pour déterminer les coûts de transport. En général, ces chercheurs tiennent compte de la capacité des camions et calculent les coûts de transport en utilisant un taux quelconque (\$/100lbs, \$/km, \$/véhicule, \$/livraison, \$/palette, *etc.*). Évidemment, la précision des coûts estimés dépend de la justesse des taux utilisés.

Tableau 2.3 - Méthodes de calcul des coûts de transport dans les modèles d'optimisation globale

Article	Méthode de calcul des coûts de transport (C_{transp})
Tyworth et Zeng (1997) Swenseth et Godfrey (2002)	<u>Transport d'une seule pièce:</u> $C_{transp} = c_v$ c_v : taux de transport (\$/100lbs) * demande annuelle * poids/unité (lbs) / 100 où le taux de transport est une fonction non linéaire dépendant de Q et du mode de transport (TL ou LTL)
Qu et al. (1999)	<u>Transport de plusieurs pièces:</u> $C_{transp} = c_f + c_v$ c_f : coût fixe/fournisseur visité (\$) c_v : coût variable de transport/distance parcourue (\$/km) * distance minimale pour visiter tous les fournisseurs (km)
Zhao et al. (2004)	<u>Transport d'une seule pièce:</u> $C_{transp} = c_f + c_v$ c_f : coût fixe/véhicule/jour (\$/véhicule/jour) * nombre de véhicules utilisés (véhicules) * nombre de jours d'utilisation (jours) c_v : coût variable/livraison (\$/livraison) * nombre de livraisons (livraisons)
Van Norden et Van de Velde (2005)	<u>Transport de plusieurs pièces:</u> $C_{transp} = c_f + c_v$ c_f : coût fixe mensuel (\$) c_v : nombre de palettes transportées au taux 1 (palettes) * taux 1 (\$/palette) + nombre de palettes transportées au taux 2 (palettes) * taux 2 (\$/palette)

2.2.3.3. Autres coûts logistiques

En plus du transport et de la gestion des inventaires, certains chercheurs tiennent compte d'autres activités pour modéliser les coûts logistiques.

Un coût régulièrement modélisé dans la littérature est le coût de commande (C_{comm}), qui est engendré à chaque commande effectuée par le donneur d'ordres auprès d'un de ses fournisseurs. À l'occasion, les chercheurs divisent le coût de commande en deux coûts distincts (Yang et Pan

2004): le coût de commande du donneur d'ordres (coûts administratifs pour effectuer et traiter une commande comme, par exemple, l'envoi des requis au fournisseur, la préparation de la paperasse pour le transport, la réception des pièces, le suivi des pièces en transit et la facturation) et le coût de mise en course du fournisseur. D'un autre côté, Qu et al. (1999) divisent plutôt le coût d'une commande en deux termes: un coût fixe de commande par période (K), ainsi qu'un coût k_i engendré par la commande de la pièce i , c'est-à-dire lorsque la variable binaire y_{it} est égale à 1:

$$C_{comm} = \sum_{\forall t} \left(K + \sum_{\forall i} y_{it} k_i \right) \quad (2.4)$$

Par ailleurs, les coûts encourus par les ruptures de stock (C_{rupt_s}) peuvent également être modélisés. Tyworth et Zeng (1997) calculent C_{rupt_s} en supposant un nombre d'unités en rupture de stock par cycle de réapprovisionnement et en estimant les coûts engendrés par une rupture. Qu et al. (1999) utilisent plutôt une fonction représentant la demande durant le délai de réapprovisionnement pour estimer les ruptures de stock et calculer les coûts correspondants.

Enfin, certains chercheurs incluent également les coûts de production (C_{prod}) dans leur modèles (Zhao, Wang, Lai et Xia 2004). Par contre, étant donné que ces coûts ne dépendent pas des activités logistiques, ils ne seront pas pris en compte dans ce mémoire.

2.2.4. Modèles EOQ vs JAT

Pour être en mesure de déterminer le champ d'application des modèles qui seront analysés, il est important de comprendre les différences fondamentales entre deux techniques de gestion de l'approvisionnement, soit le réapprovisionnement basé la quantité économique de commande (EOQ) et le juste-à-temps (JAT). En effet, ces deux techniques engendrent des modèles très différents.

Avant le développement des techniques basées sur le JAT, les modèles de gestion des stocks étaient tous basés sur la formule du lot économique de commande, qui suppose une consommation constante des pièces ou des produits. Selon le modèle EOQ, un acheteur effectue plusieurs commandes par année auprès d'un fournisseur et la quantité fixe Q à commander est calculée de façon à minimiser les coûts totaux (Fazel 1997). Une commande est placée lorsqu'un

seuil minimum d'inventaire est atteint (s). La formule du lot économique, qui est basée sur le coût de réapprovisionnement (C_A), ainsi que sur le coût de stockage (C_S), est la suivante:

$$Q = \sqrt{\frac{2C_A D}{C_S}} \quad (2.5)$$

Donc, en supposant une demande constante (D) et une quantité fixe de réapprovisionnement, il est relativement simple de développer des modèles incluant plusieurs types de coûts logistiques.

Par contre, ces suppositions sont erronées pour les entreprises qui s'approvisionnent en JAT. En fait, ces entreprises ont comme objectif ultime de recevoir leurs pièces au rythme qu'elles les consomment. C'est pourquoi la demande doit souvent être considérée comme étant variable et, par le fait même, des modèles à détermination dynamique de la taille des lots (*dynamic lot-sizing*) doivent être développés (Lee 2004). En plus de la demande, les chercheurs considèrent parfois que le délais de réapprovisionnement est variable (Yang et Pan 2004). Bref, étant donné que les modèles basés sur le JAT modélisent une toute autre réalité, ils sont généralement beaucoup plus complexes.

Par ailleurs, comme le mentionnent Johnson et Stice (1993), les modèles basés sur la formule du lot économique sous-estiment les coûts liés aux inventaires, tandis que les modèles basés sur le JAT sous-estiment souvent les coûts liés au fait de maintenir très peu d'inventaires dans la chaîne d'approvisionnement (Johnson et Stice (1993), cité dans Fazel (1997), p.497). Ainsi, il est possible de constater que ces deux techniques de gestion de l'approvisionnement engendrent des modèles dans lesquels les coûts sont difficiles à estimer.

2.2.5. Revue des modèles d'optimisation globale en logistique

Cette section de la revue de littérature vise à porter un regard critique sur les modèles existants. Bien que de nombreux auteurs aient étudié les problèmes de transport et de gestion des inventaires, les modèles intégrant ces deux types d'activités logistiques sont peu nombreux. Comme le soulignent Goetschalckx et al. (2002), les travaux de recherche dans le domaine des chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique ne tiennent pas compte, en général, de la gestion des inventaires. Par exemple, dans une revue de littérature analysant 18 articles reliés à l'optimisation globale de la chaîne logistique, Meixell et Gargeya (2005) observent que

seulement cinq de ces articles incluent les coûts d'inventaires. Par ailleurs, l'impact relié aux longues durées de transit, c'est-à-dire aux importantes distances séparant les fournisseurs des clients, a été étudié dans seulement deux des 18 articles. Néanmoins, il existe tout de même plusieurs modèles intéressants pour ce mémoire.

Cette section présente 15 modèles récents visant à minimiser les coûts logistiques totaux. Les principales caractéristiques de ces modèles sont résumées dans le tableau 2.4.

2.2.5.1. Approvisionnement d'une seule pièce

Certains chercheurs se sont concentrés sur les systèmes logistiques dans lesquels il n'y a qu'une seule pièce (ou produit, ou composant) à approvisionner. Bien que ces modèles se rapprochent rarement de la réalité, ils sont tout de même intéressants, notamment au niveau des fonctions de coûts utilisées.

Tout d'abord, Li et O'Brien (1999) ont développé, à l'aide d'un objectif multicritère, un des rares modèles permettant d'évaluer la performance d'une chaîne logistique selon des critères autres qu'économiques. Ce modèle minimise le niveau d'insatisfaction dans la chaîne d'approvisionnement en pondérant quatre mesures de performance, soit les profits, le délai de réapprovisionnement, la ponctualité des livraisons et les inventaires en main. Malgré l'effort d'évaluer la performance globale de la chaîne logistique, le modèle demeure purement théorique.

Tyworth et Zeng (1997) présentent un modèle dans lequel la fonction développée pour le calcul des coûts d'inventaires (C_{inv}) est la suivante:

$$C_{inv} = \bar{d}_T \bar{d} V h_T + \left(\frac{Q}{2} + s - \bar{d}_R \bar{D} \right) V h_M \quad (2.6)$$

où	\bar{d}_T	durée moyenne de transit pour la pièce considérée (jours)
	\bar{d}_R	délai moyen de réapprovisionnement pour la pièce considérée (jours)
	\bar{D}	demande moyenne/jour (unités)
	V	valeur unitaire de la pièce (\$)
	h_T	coût annuel d'inventaire pour le stock en transit (% de la valeur de la pièce)
	h_M	coût annuel d'inventaire pour le stock en main (% de la valeur de la pièce)
	Q	quantité fixe de commande (unités): comprend une moyenne et un écart-type
	s	point de commande (unités)

Tableau 2.4 - Résumé de quelques modèles récents visant à minimiser les coûts logistiques totaux

Article	Modèle basé sur EOQ?	Nombre de pièces (ou produits) traitées	Coûts à minimiser (objectif)	Principales hypothèses	Variables de décision	Contraintes
Tyworth et Zeng (1997)	non	1	1) transports 2) inventaires 3) commandes 4) ruptures de stock	1) demande variable (moyenne et écart type) 2) demande et délai d'approvisionnement indépendants	1) quantité commandée (Q) 2) point de commande (s)	-
Bertazzi et Speranza (1999)	non	plusieurs	1) transports 2) inventaires	1) demande constante 2) la quantité livrée/livraison est inversement proportionnelle à la fréquence de livraison 3) ruptures de stock non permises 4) réapprovisionnement instantané 5) un seul fournisseur	1) pièces livrées à chaque fréquence 2) nombre de véhicules utilisés pour chaque fréquence 3) inventaires de fin de période	1) demande 2) capacité des véhicules 3) niveaux d'inventaires
Qu et al. (1999)	oui	plusieurs	1) transports 2) inventaires 3) commandes 4) ruptures de stock	1) demande constante 2) cycle de réapprovisionnement constant	Pour chaque pièce : 1) périodes de commande 2) point de commande (s)	-
Bertazzi et al. (2000)	non	plusieurs	1) transports 2) inventaires	<i>Idem</i> à Bertazzi et Speranza (1999)	1) pièces livrées à chaque fréquence 2) nombre de véhicules utilisés pour chaque fréquence	1) demande 2) capacité des véhicules
Favaretto et al. (2001)	non	plusieurs	1) transports 2) inventaires	<i>Idem</i> à Bertazzi et Speranza (1999)	<i>Idem</i> à Bertazzi et Speranza (1999)	<i>Idem</i> à Bertazzi et Speranza (1999)
Swenseth et Godfrey (2002)	oui	1	1) transports 2) inventaires 3) commandes	1) demande constante 2) ruptures de stock non permises	1) quantité commandée (Q) 2) taux de transport (TL ou LTL)	-
Goetschalckx, Vidal et Dogan (2002)	non	plusieurs	1) transports 2) inventaires 3) production 4) entreposage	1) demande saisonnière 2) pas de stock de sécurité 3) transport direct d'un nœud du réseau à l'autre (pas de consolidation, transbordement, etc.)	1) flots 2) usines utilisées	1) demande 2) conservation de flot 3) capacité des fournisseurs / usines / machines 4) autres
Chen et Chen (2004)	oui	plusieurs	1) inventaires 2) commandes (incluant les coûts de transport)	1) demande constante 2) réapprovisionnement instantané	1) cycle de réapprovisionnement 2) quantité commandée (Q)	-
Lee (2004)	non	1	1) transports 2) inventaires	1) demande variable	1) quantité commandée par période 2) inventaires de fin de période	1) quantité minimale de commande 2) niveaux d'inventaires
Langevin (2004)	non	1	1) transports	<i>Uncapacitated Transportation Problem</i>	1) nombre d'unités transportées de chaque fournisseur à chaque usine	1) conservation de flot
Zhao et al. (2004)	oui	1	1) transports 2) inventaires 3) commandes 4) production	1) demande constante 2) ruptures de stock non permises 3) délai d'approvisionnement constant	1) quantité commandée (Q)	1) capacité des véhicules 2) durée d'une journée de travail (chauffeurs)
Ahn et Seo (2005)	oui	plusieurs	1) transports 2) inventaires	1) demande constante 2) délai d'approvisionnement constant	1) point de commande (s) 2) quantité commandée (Q)	1) niveaux d'inventaires 2) stock de sécurité 3) contraintes liées au transport
Eksioglu et al. (2005)	non	1	1) transports 2) inventaires 3) production	1) demande variable 2) aucune contraintes au niveau du transport des pièces	À chaque période : 1) nombre d'unités transportées 2) nombre d'unités en inventaire 3) nombre d'unités produites	1) conservation de flot
Van Norden et Van de Velde (2005)	non	plusieurs	1) transports 2) inventaires 3) commandes	1) demande variable 2) ruptures de stock non permises 3) toutes les pièces ont le même volume	Pour chaque pièce : 1) quantité commandée par période 2) inventaires de fin de période 3) nombre de palettes transportées	1) niveaux d'inventaires 2) capacité d'une palette 3) taux de transport
Chen et al. (2006)	non	plusieurs	1) transports 2) inventaires	1) plan de distribution: demande connue (mais variable) 2) ruptures de stock non permises 3) fenêtres de temps à respecter	1) nombre d'unités transportées 2) inventaires de fin de période	1) conservation de flot 2) fenêtres de temps 3) capacité des centres de transbordement

Contrairement à la méthode classique de détermination des coûts d'inventaires (cf. section 2.2.3.1), la fonction 2.6 permet de distinguer les stocks en transit des stocks en main, ce qui modélise de façon plus juste la réalité. De plus, elle peut être adaptée à un problème avec plusieurs pièces. Il s'agirait d'ajouter un indice pour faire référence à la pièce et d'effectuer la somme des coûts pour toutes les pièces. Par ailleurs, en remplaçant la quantité fixe de commande par une variable à déterminer à chaque période, il serait possible de se baser sur cette fonction pour modéliser les inventaires dans un système d'approvisionnement en JAT.

Par ailleurs, il est intéressant d'étudier brièvement le modèle de Lee (2004), qui tient compte d'une demande variable (cf. tableau 2.4). Dans ce modèle, la quantité commandée à chaque période (q_t) est variable. Voici la fonction objectif du modèle:

$$\min \sum_{\forall t} (P(q_t) + h_t I_t) \quad (2.7)$$

où h_t coût pour maintenir une unité en inventaire durant la période t (\$/unité)
 I_t inventaire en main à la fin de la période t (unités)
 $P(q_t)$ coûts de transport pour livrer les q_t unités commandées à la période t (\$)

Ce modèle permet de définir une fonction $P(q_t)$ liée aux coûts de transport. Cette fonction peut être définie analytiquement ou, encore, déterminée à l'aide d'un sous-problème. Ainsi, ce type de fonction donne plus de flexibilité au modèle.

L'étude des modèles visant l'approvisionnement d'une seule pièce a permis de retenir quelques points pertinents pour ce mémoire. L'apport de ces modèles demeure toutefois limité.

2.2.5.2. Approvisionnement de plusieurs pièces

Évidemment, les modèles développés pour l'approvisionnement de plusieurs pièces (*multicommodity problems*) sont beaucoup plus intéressants puisqu'ils se rapprochent davantage de la réalité. Par contre, ils sont plus complexes.

Comme le soulignent Chen et Chen (2004), d'importantes économies peuvent être réalisées en coordonnant l'approvisionnement de plusieurs pièces puisque certains coûts, comme les coûts de transport et de commande, sont généralement partagés par plusieurs pièces. D'ailleurs, pour optimiser globalement le système, il faut entre autres tenir compte de la valeur des pièces. Par

exemple, un modèle bien conçu devrait forcer à réduire les inventaires des pièces dispendieuses, alors que pour les pièces de moindre valeur, ce sont les coûts de transport qui devraient être réduits (Slats, Bhola, Evers et Dijkhuizen 1995 ; Fazel 1997).

Récemment, plusieurs chercheurs ont tenté de développer des modèles globaux d'optimisation pour l'approvisionnement de plusieurs pièces. D'abord, Qu et al. (1999) ont bâti une heuristique pour résoudre un modèle visant à minimiser les coûts logistiques totaux. Pour être en mesure de générer des solutions de bonne qualité, Qu et al. divisent le modèle en séparant le problème de transport (sous-problème) du problème de gestion des inventaires (problème maître). Étant donné que les auteurs ne considèrent pas les contraintes de capacité des remorques, le sous-problème (SP) est un problème de voyageur de commerce (PVC), c'est-à-dire qu'il permet d'établir une tournée de distance minimale en fonction des clients à visiter. Pour générer des solutions, il s'agit de résoudre itérativement le problème maître (PM) et le SP. L'article de Qu et al. est intéressant puisqu'il permet de résoudre un modèle complexe à l'aide d'une heuristique simple, ce qui peut s'avérer très utile pour résoudre des problèmes de grande taille. De plus, l'idée à la base de l'heuristique, soit la division du problème en un PM et un SP, peut être adaptée à de nombreux types de problèmes.

D'un autre côté, le modèle de Van Norden et Van de Velde (2005) est pertinent puisqu'il suppose une demande variable. En fait, ce modèle cherche à minimiser les coûts de transport, d'inventaires et de commande, tout en respectant les contraintes liées aux niveaux d'inventaires, ainsi qu'au contrat de transport. Voici la fonction objectif du modèle:

$$C_{TOT} = \sum_{\forall t} \sum_{\forall i} (h_i I_{it} + k_{it} y_{it}) + \sum_{\forall t} (c_0 + c_1 p1_t + c_2 p2_t) \quad (2.8)$$

où	h_i	coût pour maintenir une unité en inventaire durant la période t (\$/unité)
	k_{it}	coût fixe pour commander la pièce i à la période t (\$)
	c_0	coût fixe de transport par période (\$)
	c_1	taux de transport économique (\$/unité)
	c_2	taux de transport normal (\$/unité)
	$p1_t$	nombre de palettes transportées avec le taux c_1 à la période t (unités)
	$p2_t$	nombre de palettes transportées avec le taux c_2 à la période t (unités)
	I_{it}	nombre d'unités de la pièce i en inventaire à la fin de la période t (unités)
	y_{it}	variable binaire égale à 1 si la pièce i est commandée à la période t , 0 sinon

Le principal avantage de ce modèle vient du fait qu'il permet de cumuler les coûts pour toutes les pièces et toutes les périodes, ce qui est nécessaire lorsque la demande est variable. Les chercheurs ont développé une heuristique basée sur une relaxation lagrangienne pour résoudre le modèle. Tout comme Qu et al. (1999), Van Norden et Van de Velde résolvent leur modèle en deux étapes pour être en mesure de trouver des solutions de bonne qualité. En effet, ceux-ci relaxent la contrainte qui complexifie le modèle, c'est-à-dire la contrainte qui détermine combien de palettes sont transportées selon chaque taux de transport, et divisent le problème en deux SP: un SP concernant le nombre de palettes à transporter (*SP1*) et un autre pour le reste du modèle (*SP2*). Il s'agit de trouver une solution au *SP1* qui satisfait le *SP2*. Cette heuristique est toutefois moins flexible que celle de Qu et al. (1999).

Par ailleurs, Goetschalckx et al. (2002) présentent un modèle intégrant les activités de production et d'entreposage, ainsi que le transport et la gestion des inventaires dans un réseau composé d'usines de fabrication et de distribution. Les auteurs résolvent un problème de flot à coût minimum incluant 12 produits et un réseau de transport de 4074 arcs. Ils ont observé des économies de 2% (sur des coûts logistiques totaux de 401 000 000 \$ par année) en comparaison au même problème résolu avec un modèle qui n'inclut pas les coûts d'inventaires. Ceci montre l'importance d'intégrer la gestion des inventaires dans les modèles logistiques globaux.

Dans les modèles étudiés jusqu'à maintenant, les variables à déterminer sont, en général, le point de commande s et la quantité fixe à commander (Q) ou, encore, les quantités à commander à chaque période, ainsi que les inventaires de fin de période. Peu de chercheurs ont développé des modèles d'optimisation globaux dans lesquels les fréquences de livraison sont des variables de décision. Ce type de modèle sera étudié en détail puisque les fréquences de livraison représentent des variables de décision très intéressantes pour optimiser globalement un système logistique. En effet, ces variables affectent à la fois les opérations de transport et les niveaux d'inventaires à travers la chaîne d'approvisionnement.

Bertazzi et Speranza (1999) ont développé un modèle de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) qui minimise les coûts de transport et d'inventaires, et ce, dans la partie amont de la chaîne logistique, c'est-à-dire entre un donneur d'ordres et un de ses fournisseurs. Pour chacune des pièces à approvisionner, le problème consiste à déterminer les fréquences de livraison optimales, parmi les fréquences disponibles, pour le réseau de transport considéré (cf.

figure 2.2). En fait, il faut choisir, pour chaque lien du réseau, une ou des fréquences de livraison parmi les fréquences disponibles. Il est à noter que les auteurs supposent une demande constante et que les réapprovisionnements sont effectués sur une base périodique. Ainsi, les fréquences de livraison déterminent les niveaux d'inventaire à chaque période.

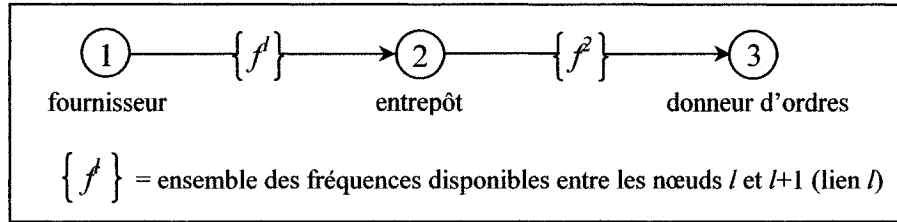


Figure 2.2 - Réseau de transport avec fréquences discrètes

Pour le calcul des coûts d'inventaires, Bertazzi et Speranza utilisent un coefficient h_i^l indiquant, pour chaque pièce i et chaque nœud l du réseau, le coût de maintenir une unité en inventaire durant une période. En fonction des niveaux d'inventaires à chaque nœud du réseau (I_{it}^l), il est possible de calculer les coûts d'inventaires moyens (\bar{C}_{inv}):

$$\bar{C}_{inv} = 1/H \sum_{\forall l} \sum_{\forall i} \sum_{\forall t} h_i^l I_{it}^l \quad (2.9)$$

Le coefficient $1/H$ est nécessaire pour calculer les coûts d'inventaires moyens par période, puisque H représente le nombre total de périodes comprises dans l'horizon de planification considéré. Il est à noter que les auteurs supposent que le nombre d'unités en inventaire à la fin de la période t (I_{it}^l) est le nombre moyen d'unités qui ont été entreposées durant la période. Dans la littérature, cette hypothèse est fréquemment rencontrée.

Au niveau des coûts de transport, le modèle de Bertazzi et Speranza est simple puisque le réseau de transport considéré ne comprend qu'un seul fournisseur. Donc, en fonction du nombre de véhicules qui suivent une fréquence j sur un lien l du réseau (z_j^l) et à l'aide du coefficient c_j^l qui représente le coût de transport pour parcourir le lien l à la fréquence j , les auteurs peuvent calculer les coûts de transport moyens par période (\bar{C}_{transp}):

$$\bar{C}_{transp} = \sum_{\forall l} \sum_{\forall j} (c_j^l / t_j^l) z_j^l \quad (2.10)$$

Le modèle de Bertazzi et Speranza est détaillé ci-bas. Comme il est possible de le constater, trois types de contraintes sont incluses dans le modèle, soit des contraintes liées à la demande (2.12), à la capacité des véhicules (2.13) et aux niveaux d'inventaires (2.14 à 2.16). Les contraintes 2.14 à 2.16 mettent en évidence une des lacunes du modèle, c'est-à-dire le fait que les réapprovisionnements sont considérés comme instantanés. En effet, les inventaires en transit ne sont pas considérés.

$$\min \bar{C}_{inv} + \bar{C}_{transp} \quad (2.11)$$

s.c.

$$\sum_{j \in J^l} x_{ij}^l = 1, \quad \forall i, \forall l / m \quad \text{demande comblée} \quad (2.12)$$

$$\sum_{\forall i} v_i t_j^l D_i x_{ij}^l \leq r_j^l z_j^l, \quad j \in J^l, \forall l / m \quad \text{capacité des véhicules} \quad (2.13)$$

$$I_{it}^1 = I_i^1 + D_i t - \sum_{j \in J^1} p_{jt}^1 t_j^1 D_i x_{ij}^1, \quad \forall i, \forall t \quad \text{inv. - nœud origine} \quad (2.14)$$

$$I_{it}^l = I_i^l + \sum_{j \in J^{l-1}} p_{jt}^{l-1} t_j^{l-1} D_i x_{ij}^{l-1} - \sum_{j \in J^l} p_{jt}^l t_j^l D_i x_{ij}^l, \quad \forall i, \forall t, \forall l / \{1, m\} \quad \text{inv. - nœuds interm.} \quad (2.15)$$

$$I_{it}^m = I_i^m + \sum_{j \in J^{m-1}} p_{jt}^{m-1} t_j^{m-1} D_i x_{ij}^{m-1} - D_i t, \quad \forall i, \forall t \quad \text{inv. - nœud destination} \quad (2.16)$$

$$I_i^l \geq 0, \quad \forall i, \forall l \quad (2.17)$$

$$I_{it}^l \geq 0, \quad \forall i, \forall t, \forall l \quad (2.18)$$

$$x_{ij}^l \geq 0, \quad \forall i, j \in J^l, \forall l \quad (2.19)$$

$$z_j^l \text{ entier}, \quad j \in J^l, \forall l \quad (2.20)$$

- où
- m nombre total de nœuds dans le réseau (nœud m = donneur d'ordres)
 - H horizon de planification (H périodes en tout)
 - h_i^l coût pour maintenir en inventaire la pièce i durant une période au nœud l
 - v_i volume de la pièce i
 - D_i demande de la pièce i pour une période
 - J^l ensemble des fréquences sur le lien l
 - f_j^l fréquence j sur le lien l (où $j \in J^l$)
 - $t_j^l = 1 / f_j^l$ nombre de périodes entre deux livraisons de fréquence j sur le lien l
 - r_j^l capacité du véhicule voyageant à la fréquence j sur le lien l
 - c_j^l coût de transport pour parcourir le lien l à la fréquence j
 - x_{ij}^l fraction de la demande de la pièce i livrée à la fréquence j sur le lien l

z_j^l	nombre de véhicules qui suivent une fréquence j sur un lien l
I_i^l	inventaire de départ ($t = 0$) de la pièce i au nœud l
I_{it}^l	niveau d'inventaire de la pièce i à la fin de la période t au nœud l
p_{jt}^l	nombre de livraisons réalisées jusqu'à la période t sur le lien l si la fréquence j est utilisée

La complexité du problème fait en sorte que le modèle de Bertazzi et Speranza est NP-dur. Toutefois, pour montrer les avantages d'optimiser le système en fonction des fréquences de livraison, les auteurs ont effectué un exemple avec une seule pièce et un réseau de deux liens. La solution optimale obtenue avec ce modèle est de loin supérieure à une solution basée sur la formule du lot économique ou sur une stratégie visant à livrer les pièces dès qu'un camion peut être rempli.

Suite à ces travaux, Bertazzi et al. (2000) ont développé un modèle plus simple pour résoudre le même problème. En effet, les auteurs supposent qu'il n'y a qu'un seul segment dans le réseau, soit un lien direct entre le fournisseur et le donneur d'ordres. Pour résoudre leur modèle, qui est tout de même NP-dur, Bertazzi et al. ont conçu une méthodologie de résolution basée sur des règles de dominance. Par exemple, une solution est dominée par une autre solution ayant des coûts d'inventaires plus bas, mais des coûts de transport similaires. Les règles de dominance permettent de resserrer la relaxation linéaire, ce qui augmente du même coup l'efficacité de l'algorithme de séparation et d'évaluation progressive (*branch and bound algorithm*) utilisé pour la résolution. En fait, l'heuristique développée par les auteurs permet de résoudre des problèmes avec 10 000 pièces et 15 fréquences différentes.

Un autre modèle dans lequel les fréquences de livraisons sont des variables de décision est celui de Favaretto et al. (2001). Par rapport à celui de Bertazzi et al. (2000), ce modèle comprend deux points particuliers. Premièrement, la quantité de la pièce i livrée au donneur d'ordres à la fréquence f_j n'est pas nécessairement constante à chaque livraison, ce qui rend le modèle plus flexible. Le calcul des inventaires doit donc être effectué à chaque période, ce qui n'est pas le cas dans le modèle de Bertazzi et al. Deuxièmement, le modèle de Favaretto et al. tient compte de phases, c'est-à-dire l'instant de la première occurrence d'un événement suivant une fréquence donnée.

En somme, cette section traitant des modèles globaux d'optimisation en logistique a permis de détailler les modèles pertinents pour ce mémoire. En effet, différents types de fonctions objectifs visant à minimiser les coûts logistiques ont été analysés en détail et certaines approches de résolution ont été présentées. De plus, il a été possible de constater le potentiel des fréquences de livraison comme variables de décision. Toutefois, en étudiant les hypothèses émises par les différents chercheurs, il faut constater que la grande majorité des modèles ne sont pas directement applicables en pratique. Par contre, la variété des modèles disponibles fait en sorte que de nombreux systèmes logistiques ont déjà été modélisés, de près ou de loin.

2.2.6. Modèles de flot à coût minimum

Pour terminer l'étude des modèles globaux d'optimisation en logistique, il s'avère intéressant d'analyser quelques modèles de flot à coût minimum. Dans la littérature, les problèmes de transport sont souvent résolus à l'aide de ce type de modèle. En fait, la structure relativement simple de ces modèles permet de résoudre des problèmes de grande taille.

D'abord, voici la représentation du problème de transport classique (Sharma et Sharma 2000 ; Sharma et Prasad 2003):

$$\min \sum_f \sum_u c_{fu} x_{fu} \quad (2.21)$$

s.c.

$$\sum_u x_{fu} \leq O_f, \quad f = 1, \dots, m \quad \text{respect de l'offre} \quad (2.22)$$

$$\sum_f x_{fu} = D_u, \quad u = 1, \dots, n \quad \text{respect de la demande} \quad (2.23)$$

$$x_{fu} \geq 0, \quad \forall f, \forall u \quad (2.24)$$

où c_{fu} coût de transport du fournisseur f à l'usine u (n usines en tout)
 O_f capacité de production du fournisseur f (m fournisseurs en tout)
 D_u demande de l'usine u
 x_{fu} nombre d'unités transportées du fournisseur f à l'usine u

À partir de ce modèle de transport de base (*uncapacitated transportation problem*), qui consiste simplement à minimiser les coûts de transport en respectant l'offre et la demande, de nombreux modèles de flot à coût minimum ont été développés pour modéliser des systèmes logistiques plus complexes.

Par exemple, dans une revue de littérature concernant les modèles d'optimisation liés au transport longue distance (*long haul transportation*), Crainic (2002) présente deux modèles de flot à coût minimum orientés vers le design de réseaux. Un premier modèle permet de déterminer les chemins que doivent emprunter les différents produits à livrer dans un réseau incluant plusieurs fournisseurs et clients, de façon à minimiser les coûts de transport tout en respectant la capacité des camions utilisés. Dans ce modèle, les chemins possibles pour chaque produit sont prédéterminés. Un second modèle, plus complexe, permet d'inclure des opérations de transbordement.

De plus, Chen et al. (2006) ont développé un modèle de flot à coût minimum permettant d'optimiser un réseau dans lequel plusieurs fournisseurs approvisionnent plusieurs usines via un ou des centres de consolidation. Le programme linéaire en nombres entiers (PLNE) associé à ce modèle minimise les coûts de transport, calculés en fonction de la distance totale parcourue, ainsi que les coûts d'inventaires liés aux pièces entreposées aux centres de consolidation. Étant donné que les coûts d'inventaires et de transport sont optimisés dans un même modèle, les auteurs ont dû ajouter une dimension temporelle au modèle, c'est-à-dire que les niveaux d'inventaires sont déterminés à chaque période considérée. Ce problème de transbordement s'avère NP-dur.

Dans un même ordre d'idées, Eksioglu et al. (2005) ont développé un modèle visant à minimiser les coûts de production, de transport et d'inventaires dans un réseau incluant plusieurs fournisseurs et usines. Ce problème de flot à coût minimum modélise le déplacement des pièces et détermine les niveaux d'inventaires à chaque nœud du graphe. La figure 2.3 représente un graphe comprenant deux fournisseurs et une usine (horizon de planification de deux périodes).

Ce modèle de flot comporte deux lacunes majeures. D'abord, il ne tient compte que d'une seule pièce. De plus, il modélise un réseau de transport qui ne comprend que des liens directs des fournisseurs aux usines. Par contre, la force de ce modèle est qu'il permet de minimiser à la fois les coûts de transport et d'inventaires, tout comme c'est le cas du modèle de Chen et al. (2006). En effet, le graphe modélise le déplacement physique des produits, c'est-à-dire les opérations de transport, ainsi que les niveaux d'inventaires à chaque nœud du réseau et à chaque période. Cependant, le nombre de variables est proportionnel au nombre de périodes considérées, ce qui peut causer des difficultés pour résoudre des problèmes de taille considérable.

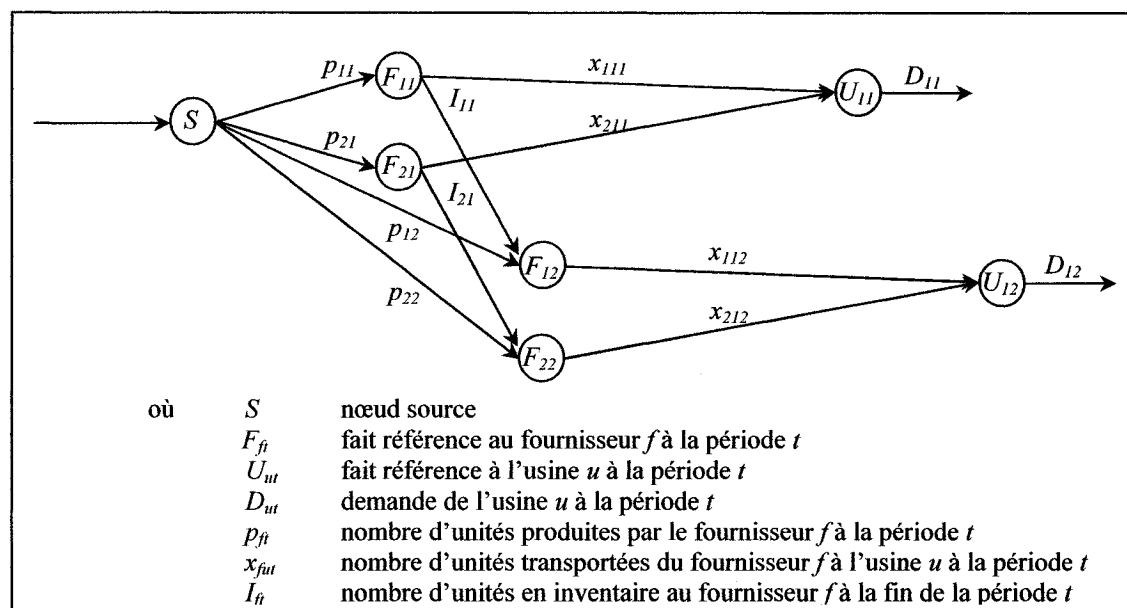


Figure 2.3 - Exemple de graphe pour le modèle d'Eksioglu et al. (2005)

Bref, il est possible de constater le potentiel des problèmes de flot à coût minimum pour l'optimisation des opérations logistiques, surtout au niveau des opérations de transport. Par contre, les modèles permettant de résoudre des problèmes de grande taille modélisent des réseaux de transport simples.

2.2.7. Outils logiciels et solutions développées sur mesure

Pour terminer cette revue bibliographique, il s'avère intéressant de jeter un coup d'œil aux logiciels et solutions qui ont été récemment développés pour optimiser les opérations logistiques. Le tableau 2.5 résume les principales caractéristiques de 11 logiciels ou solutions proposés par diverses entreprises œuvrant dans le domaine de la logistique. Ces entreprises sont divisées en deux catégories: les prestataires de services logistiques (3PL ou TPL), qui développent habituellement des solutions « sur mesure » adaptées aux besoins de leurs clients, ainsi que les entreprises qui concentrent leurs efforts à la conception et à la commercialisation de logiciels destinés à la gestion de certaines opérations logistiques. Par exemple, Manugistics et Lean Logistics sont des prestataires de services logistiques, alors que Symbol et Dynasis commercialisent des logiciels qui doivent être paramétrés.

Tableau 2.5 - Logiciels et solutions développés pour l'optimisation des opérations logistiques

Logiciel ou solution	Entreprise	Fonction			Principales caractéristiques	Site Internet
		Gestion des opérations de transport	Gestion des inventaires	Gestion d'autres opérations logistiques		
Manugistics Transportation Management Solution	Manugistics (TPL)	CTM			<ul style="list-style-type: none"> - permet l'optimisation des opérations d'approvisionnement et de distribution en considérant des contraintes opérationnelles réelles - vise la réduction des coûts de transport et des délais d'approvisionnement, l'amélioration du service à la clientèle et l'augmentation des revenus - facilite la collaboration entre les fournisseurs, les fabricants et les transporteurs en utilisant des technologies telles l'EDI, le langage XML ainsi que des plates formes basées sur le web 	http://www.manugistics.com/
Manugistics CPFR Solution	Manugistics (TPL)		CPFR		<ul style="list-style-type: none"> - vise la réduction de l'écart entre la demande et les quantités approvisionnées - permet la collaboration grâce à une application basée sur le web - facilite l'échange d'informations critiques: prévisions, stocks, points de vente, etc. - envoi des alertes lorsque des variations anormales sont enregistrées 	http://www.manugistics.com/
Elite Series Transportation Management System	Tecsys (TPL)	TMS			<ul style="list-style-type: none"> - développé pour les petits colis et les expéditions LTL - concerne les opérations de distribution - vise l'optimisation de la tarification, du routage, du suivi des expéditions et de l'analyse des performances - plate-forme web 	http://www.tecsys.com/
Menlo's LMS Transportation Management	Menlo Worldwide (TPL)	TMS		commandes	<ul style="list-style-type: none"> - permet la gestion des commandes et du transport - vise la minimisation des coûts de transport tout en respectant le niveau de service désiré (JIT) - suivi des expédition en temps réel - plate-forme Baan 	http://www.menloworldwide.com/
n/a	Symbol	X			<ul style="list-style-type: none"> - système d'échange de données basé sur une technologie de communication sans fil (LAN - local area network) - permet une meilleure communication en fournissant des informations exactes et en temps réel (meilleur suivi des expéditions en transit, amélioration de la gestion des exceptions, ...) 	http://www.symbol.com/
Manhattan Associates' Transportation Management Solutions	Manhattan Associates (TPL)	TMS			<ul style="list-style-type: none"> - vise l'optimisation de la tarification, de la planification et de l'exécution des opérations de transport et du chargement de remorques - permet de mesurer la performance du système - plate-forme web - met l'accent sur l'intégration de différentes solutions pour optimiser globalement le système 	http://www.manhattan.com/
n/a	Lean Logistics (TPL)	CTM	X		<ul style="list-style-type: none"> - solution sur mesure (développée en fonction du client) - une plate-forme web permet l'échange stratégique d'informations entre les partenaires commerciaux impliqués (fournisseurs, transporteurs, tierces parties, fabricants) - permet une mise à jour, en temps réel, du statut des expéditions - donne accès aux niveaux d'inventaires (en commande, en transit et en main), ce qui permet de tester diverses stratégies d'approvisionnement pour réduire les inventaires 	http://www.leanlogistics.com/
N. Skep Procurement Planning	Dynasis		X	commandes	<ul style="list-style-type: none"> - progiciel visant l'optimisation du plan d'approvisionnement (gestion des commandes et des livraisons) - calcul des coûts de commandes et d'inventaires 	http://www.dynasys.com/
E.W.R. Plus	Influe (TPL)	X	X	commandes	<ul style="list-style-type: none"> - permet la gestion du réapprovisionnement des clients (axé sur la distribution) - optimise le flux aval des produits : transport des produits, calcul des besoins des clients, gestion des inventaires - échange d'informations par EDI - permet la prévision des besoins pour bien gérer les fluctuations 	http://www.influe.com/
Cosmos Transport	Cosmos (TPL)	TMS			<ul style="list-style-type: none"> - permet la gestion complète des opérations de transport (tarification, choix des transporteurs, facturation, détermination des expéditions, etc.) - permet de comparer divers scénarios par simulation - spécialisé pour le transport multimodal 	http://www.cosmos-consultants.com/
Pro Shipper Supply	DDS Logistics (TPL)	TMS			<ul style="list-style-type: none"> - gestion des opérations d'approvisionnement, de l'achat des pièces jusqu'à la réception - optimisation des coûts logistiques (transport) - gestion des exceptions: suivi des expéditions par Internet et EDI 	http://www.ddslogistics.com/

Comme il est possible de le constater, la plupart des entreprises présentées dans le tableau 2.5 sont des TPL, ce qui met en évidence la tendance actuelle dans l'industrie à développer des solutions adaptées aux besoins des clients. Par contre, très peu d'entreprises sont en mesure d'offrir des solutions qui optimisent globalement la chaîne d'approvisionnement. Par exemple, dans le tableau 2.5, il n'y a que Lean Logistics et Influe qui offrent des solutions qui touchent à la fois aux opérations de transport, ainsi qu'au contrôle des inventaires. Les autres entreprises offrent soit un logiciel de gestion des opérations de transport (TMS, CTM, *etc.*), soit une solution visant l'optimisation de la gestion des stocks (prévisions de la demande, détermination des quantités de réapprovisionnement, calcul des lots, *etc.*).

Concernant la gestion des opérations de transport, il est possible de distinguer trois différents niveaux de solutions. Le premier niveau touche le développement de solutions de base pour faciliter la gestion des opérations de transport comme, par exemple, l'utilisation d'une technologie sans fil pour améliorer le suivi des expéditions (se référer à la solution de Symbol). Le second niveau concerne les solutions visant la gestion complète des opérations de transport (TMS). Enfin, le troisième niveau se rapporte aux systèmes centralisés de gestion des opérations de transport, comme le CTM (cf. section 2.1).

Un autre aspect intéressant qui a été mis en évidence dans le tableau 2.5 est l'importance des technologies de l'information pour la gestion des opérations logistiques. En effet, la plupart des entreprises optent pour des plates-formes de communication basées sur le web, étant donné la facilité d'accès. De plus, l'EDI (échange de données informatisé) est un système d'échange d'information performant pour les entreprises qui sont prêtes à développer les infrastructures informationnelles nécessaires.

En plus des logiciels présentés dans le tableau 2.5, il existe une panoplie d'applications développées pour la gestion des entrepôts (*Warehouse Management System (WMS)*). Ces logiciels sont spécialisés au niveau du contrôle des inventaires et de la préparation des commandes. Bien que certains logiciels WMS comprennent des fonctionnalités pour optimiser le chargement des remorques, ils ne permettent pas de gérer les opérations de transport.

Bref, cette étude des logiciels et solutions visant l'optimisation des opérations logistiques a montré que, séparément, les opérations de transport et la gestion des inventaires peuvent être

considérablement optimisés. Par contre, la grande majorité des solutions actuelles ne sont pas conçues pour gérer globalement ces opérations logistiques.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE

Après avoir décrit le contexte opérationnel des usines nord-américaines de Paccar et analysé le développement scientifique dans le domaine de l'optimisation globale d'une chaîne logistique, il est maintenant possible de présenter la méthodologie employée pour atteindre les objectifs de ce projet de recherche. La première étape de cette méthodologie consiste à définir clairement le problème pour identifier la portée, ainsi que les limites du modèle à développer.

3.1. Définition du problème

Comme il a été souligné en introduction, les deux principaux objectifs de ce mémoire sont les suivants:

1. développer un modèle mathématique visant à intégrer les principales activités logistiques d'une chaîne d'approvisionnement dans le but de minimiser les coûts logistiques totaux⁵ ;
2. bâtir un système d'aide à la décision (SAD) permettant d'analyser le comportement du système logistique en fonction de la variation de divers paramètres et variables de décision.

La revue de littérature a permis de constater que les modèles visant à optimiser de façon globale une chaîne d'approvisionnement, c'est-à-dire les modèles intégrant de multiples activités logistiques, ont généralement peu d'applications pratiques étant donné que les hypothèses posées sont très contraignantes. D'ailleurs, aucun des modèles analysés ne permettrait de modéliser adéquatement le type de chaîne d'approvisionnement qui nous intéresse (cf. section 1). C'est pourquoi le modèle à développer dans ce mémoire doit permettre de corriger certaines lacunes importantes des modèles actuels:

- les réseaux de transport complexes sont rarement modélisés ;
- le calcul des coûts liés aux inventaires est, généralement, limité aux inventaires en main, c'est-à-dire qu'il exclut les inventaires en transit, ce qui représente une lacune majeure dans le cas d'une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique ;

⁵ Il faut rappeler que ce projet de recherche concerne les chaînes d'approvisionnement dans lesquelles les partenaires commerciaux impliqués sont dispersés sur une vaste étendue géographique (*spread supply chains*).

- en général, la complexité des modèles force les chercheurs à limiter le nombre de pièces (ou produits) prises en compte ;
- dans la majorité des cas étudiés, les variables décisionnelles ne sont pas globales, c'est-à-dire qu'elles sont liées à une activité logistique en particulier, alors que certaines variables, comme les fréquences de livraison, affectent l'ensemble des activités, et ce, à plusieurs niveaux de la chaîne d'approvisionnement.

Pour être en mesure de corriger ces lacunes et développer un modèle se rapprochant davantage de la réalité, il a été déterminé que seuls les coûts de transport et d'inventaires seraient modélisés. Par conséquent, le modèle mathématique à développer doit intégrer les opérations de transport et la gestion des inventaires dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique comprenant de multiples fournisseurs et usines (*multicommodity transportation and inventory control problem*). Plus précisément, il s'agit de minimiser la totalité des coûts encourus par les donneurs d'ordres (les usines) pour supporter ces deux types d'activités logistiques. C'est donc par une gestion centralisée des opérations logistiques qu'il deviendra possible d'optimiser globalement la chaîne d'approvisionnement. Il est important de préciser que le modèle englobera uniquement les opérations liées à l'acheminement des pièces des fournisseurs de premier niveau aux usines. Par ailleurs, bien que ce mémoire traite des chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique, aucune opération de transport outre-mer ne sera considérée. En effet, le transport par camion est l'unique mode de transport qui sera modélisé.

Suite au développement du modèle mathématique, un SAD sera bâti pour évaluer l'impact de certains facteurs sur les coûts logistiques totaux. Évidemment, le modèle préalablement développé agira comme moteur d'optimisation du SAD. Concrètement, le SAD permettra de tester divers scénarios d'approvisionnement qui seront générés en faisant varier les valeurs des facteurs étudiés. Ces facteurs, qui seront détaillés à la section 3.3, peuvent être les variables de décision, comme une fréquence de livraison, ou les paramètres du problème, tel un taux de transport. En outre, le SAD permettra à l'utilisateur d'analyser le comportement du système logistique en fonction de la variation des facteurs à l'étude et, éventuellement, de prendre des décisions tactiques et opérationnelles plus éclairées. Entre autres, le SAD permettra de générer plusieurs scénarios avec des coûts logistiques semblables. Ainsi, les logisticiens pourront

départager ces scénarios avec des critères d'évaluation supplémentaires, tels le niveau de difficulté de mise en œuvre de la solution ou la probabilité de rupture de stock⁶.

3.2. Approche de modélisation

La section précédente a permis de formuler clairement le problème et les objectifs de ce mémoire. Avant d'entamer le développement du modèle, il est important de déterminer l'approche de modélisation qui convient le mieux pour le cas à l'étude.

Dans la littérature, les auteurs identifient deux principaux types d'approches pour les chaînes d'approvisionnement (Slats, Bhola, Evers et Dijkhuizen 1995):

1. modèles analytiques: optimisation (méthodes exactes ou heuristiques) ;
2. simulation.

Selon Slats et al. (1995), les modèles analytiques comportent un défaut majeur, c'est-à-dire qu'ils sont souvent trop simplistes, car de nombreuses hypothèses doivent être émises pour valider les modèles, comme il a été possible de le constater dans la revue de littérature. Donc, à ce niveau, la simulation a un avantage marqué sur l'optimisation. En effet, la simulation permet de modéliser des systèmes complexes sans réduire la taille des problèmes, tout en incluant diverses contraintes opérationnelles qui ne peuvent être traitées à l'aide de modèles analytiques. Par contre, la simulation ne permet pas de trouver une solution optimale à un problème. Bref, l'optimisation est l'approche privilégiée lorsque le système à modéliser est simple et que la fonction objectif s'évalue bien, alors que la simulation est préférable pour les systèmes complexes (Baptiste 2004).

Du point de vue de la modélisation, il est possible d'évaluer la complexité d'un système d'approvisionnement en fonction de trois facteurs principaux: la complexité et l'étendue du réseau de transport, les opérations logistiques à intégrer et le nombre de pièces (ou produits) à

⁶ Crainic (2002) divise la planification des systèmes de transport en trois niveaux: stratégique, tactique et opérationnel. Le SAD présenté dans ce mémoire concerne les niveaux tactique et opérationnel. En effet, bien que les problèmes de design de réseaux de transport ne soient pas abordés dans ce mémoire, le SAD concerne tout de même le niveau tactique de planification: « Tactical planning aims to determine, over a medium-term horizon, an efficient allocation and utilization of resources to achieve the best possible performance of the whole system. (Crainic, 2002, p.13) » Par exemple, la détermination des fréquences livraison est un type de décision effectué au niveau tactique. D'un autre côté, le SAD touche également au niveau opérationnel, qui concerne la planification à court terme. Par exemple, le SAD pourra être utilisé pour déterminer les tournées de véhicule et gérer les imprévus.

considérer (cf. figure 3.1). Ainsi, pour faciliter le choix de l'approche de modélisation, il s'avère intéressant d'évaluer la complexité de la chaîne d'approvisionnement à modéliser.

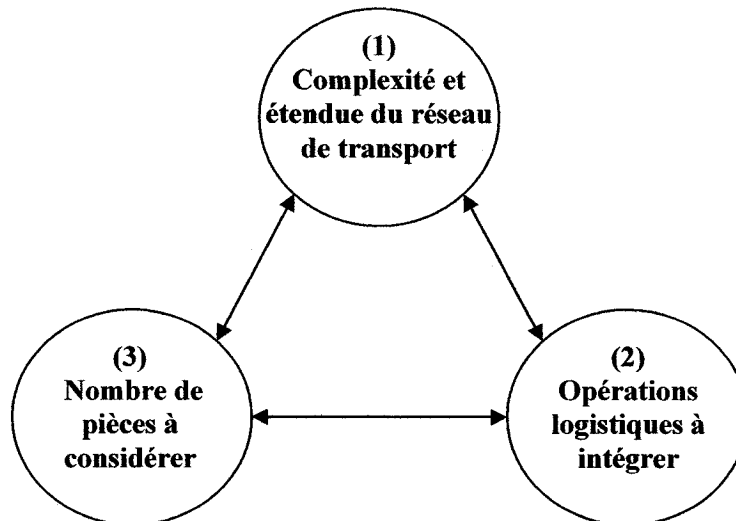


Figure 3.1 - Facteurs qui déterminent la complexité d'un système d'approvisionnement

Premièrement, dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, la distance importante entre les fournisseurs et les usines augmente la complexité du système. D'une part, le réseau de transport est complexe car plusieurs stratégies de transport doivent être combinées: expéditions directes, consolidation, transbordement, *etc.* D'autre part, les inventaires en transit ne peuvent être négligés puisque les expéditions demeurent parfois sur la route durant quelques jours.

Deuxièmement, comme il a été possible de le constater dans la revue de littérature, il n'est pas évident d'intégrer les opérations de transport et la gestion des inventaires dans un modèle analytique. La principale difficulté vient du fait que les coûts de transport et d'inventaires ne sont pas calculés avec la même base temporelle. Par exemple, pour calculer les coûts de transport, un problème de transport est résolu pour toutes les commandes qui doivent être expédiées à une certaine date. Ainsi, la base temporelle est une journée. D'un autre côté, pour calculer les coûts d'inventaires, il est nécessaire de déterminer l'inventaire moyen, durant l'horizon de planification, de chaque pièce prise en compte. Par conséquent, la base temporelle dépend de l'horizon de planification. Ces deux bases temporelles différentes causent des difficultés au niveau de la fonction objectif. Dans la littérature (cf. section 2.2.5), les auteurs contournent cette difficulté en déterminant les inventaires à chaque période de l'horizon de

planification. Par exemple, pour un horizon d'une semaine, l'inventaire sera déterminé à chaque fin de journée. Cependant, cela augmente considérablement la taille du problème et, du même coup, le temps de résolution.

Troisièmement, lorsqu'une chaîne d'approvisionnement regroupe plusieurs fournisseurs et usines, un nombre important de pièces doivent être considérées. Par exemple, une entreprise qui assemble des produits complexes peut gérer des milliers de pièces. Actuellement, seuls des réseaux de transport très simples peuvent être modélisés pour résoudre des problèmes incluant autant de pièces.

En somme, la combinaison de ces trois facteurs montre que le système d'approvisionnement à modéliser est très complexe. Ainsi, l'approche analytique seule n'est pas appropriée. Par contre, il peut être avantageux de combiner l'optimisation et la simulation. Par exemple, au niveau des opérations de transport, certains modèles d'optimisation permettent de modéliser des réseaux très complexes. Ce type de modèle peut donc constituer une base solide pour le développement d'un modèle de simulation intégrant d'autres activités logistiques.

La figure 3.2 schématise l'approche de modélisation qui sera appliquée dans ce mémoire. En effet, il s'agit de développer un modèle pour simuler le comportement du système d'approvisionnement en fonction de différents paramètres d'entrée (ces paramètres sont détaillés à la section 3.3). Au cœur de ce modèle de simulation se trouveront une application permettant de calculer les coûts d'inventaires, ainsi qu'un modèle d'optimisation dédié à la minimisation des coûts de transport. L'optimisation globale du système, c'est-à-dire la minimisation des coûts logistiques totaux, sera possible grâce à la rétroaction.

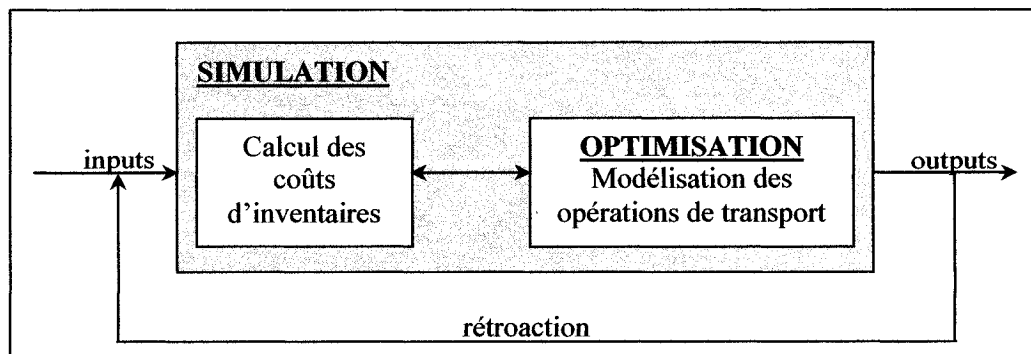


Figure 3.2 - Approche de modélisation: combinaison de la simulation et de l'optimisation

3.3. Variables de décision et paramètres à l'étude

Pour être en mesure d'optimiser les opérations logistiques de façon globale, il est nécessaire d'identifier des variables de décision qui influencent à la fois les opérations de transport et les coûts d'inventaires. Selon cette optique, deux types de variables de décision ont été retenus pour étudier le comportement des chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique:

1. les fréquences de livraison ;
2. les phases de livraison.

Une fréquence de livraison f_{ij} représente le nombre de fois qu'un fournisseur i expédie de la marchandise à une usine j au cours d'un horizon de planification donné (par exemple, deux fois par semaine), tandis qu'une phase de livraison ρ_{ij} identifie les jours au cours desquels l'usine doit être approvisionnée (par exemple, le lundi et le mercredi). D'importantes décisions sont liées à ces deux types de variables. D'une part, les fréquences de livraison déterminent les niveaux d'inventaires et affectent directement les opérations de transport. D'autre part, les phases de livraison permettent de synchroniser l'arrivée des pièces en fonction de la production, mais elles peuvent également être utilisées pour optimiser les opérations de transport. Par exemple, les opérations de consolidation sont plus avantageuses lorsque les fournisseurs d'une même région expédient leur marchandise la (ou les) même(s) journée(s). Bref, l'étude de ces deux types de variables permettra de mieux comprendre le comportement des chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique.

Bien que certains chercheurs aient développé des modèles basés sur les fréquences de livraison (cf. section 2.2.5.2), l'impact de ces variables sur le système logistique n'a pas été étudié en détail. Dans ce projet de recherche, l'étude des fréquences et des phases de livraison permettra de tester les trois hypothèses suivantes:

H2 L'augmentation des fréquences de livraison permet de réduire considérablement les coûts d'inventaires⁷.

⁷ Dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, les importantes durées de transit font en sorte que deux expéditions d'un couple (i,j) peuvent être en transit en même temps. De plus, comme il sera expliqué à la section 4.2, les expéditions n'arrivent pas nécessairement à l'usine le jour prévu, puisque les fins de semaines créent des décalages au niveau des expéditions. Bref, ces deux phénomènes pourraient faire en sorte que la réduction des coûts d'inventaires visée par l'augmentation des fréquences de livraison soit négligeable. C'est pourquoi l'hypothèse H2 a été émise.

H3 Il est possible d'augmenter les fréquences de livraison sans accroître de façon considérable les coûts logistiques totaux.

H4 L'optimisation des phases de livraison permet de réduire significativement les coûts logistiques totaux.

Ces trois hypothèses s'ajoutent à l'hypothèse *H1* qui a été émise en introduction.

En plus des variables de décision, il peut être fort intéressant d'évaluer l'impact de certains paramètres sur les coûts logistiques. Dans ce mémoire, trois paramètres feront l'objet d'une étude approfondie:

1. le pourcentage de la valeur des pièces qui est imputé comme coût d'inventaires (h) ;
2. le taux de transport (c) ;
3. la distance moyenne (l_{moy}) qui sépare les fournisseurs des usines.

Ces différents paramètres ont été choisis pour des raisons précises. Tout d'abord, le paramètre h influence directement les coûts d'inventaires. Toutefois, comme il a été souligné à la section 2.2.3.1., la valeur de h est difficile à estimer puisque ce paramètre traduit les coûts liés au capital indisponible, à l'entreposage, aux pertes et dommages, ainsi qu'aux taxes et assurances payées pour maintenir un inventaire. Il s'avère donc important d'évaluer l'impact de la variation de h sur les coûts d'inventaires.

Puis, la variation quasi aléatoire du prix du pétrole affecte les taux offerts par les transporteurs. En faisant varier ces taux, il est possible de déterminer si les stratégies de transport doivent changer en fonction du taux de transport offert. Par exemple, si les coûts de transport deviennent très importants par rapport aux coûts d'inventaires, l'augmentation des fréquences de livraison risque de ne pas être avantageuse d'un point de vue économique.

Enfin, la distance séparant les usines des fournisseurs peut certes influencer les décisions logistiques (cf. section 2.1.3). Par exemple, comment déterminer à partir de quelle distance les opérations de consolidation deviennent avantageuses ? De plus, une usine qui est, en moyenne, très éloignée de ses fournisseurs peut-elle tout de même réduire ses inventaires sans faire « gonfler » ses coûts de transport ? C'est en effectuant plusieurs simulations des opérations d'approvisionnement qu'il sera possible de répondre à ces différentes interrogations.

Comme il est schématisé à la figure 3.3, les simulations visent à déterminer la relation entre les facteurs à l'étude (X_1 , X_2 , h , c , l_{moy}) et la « réponse » du système (Y), tout en tenant compte des facteurs incontrôlables (σ) et de l'erreur provenant de la modélisation du système (ξ)⁸. Afin de structurer les simulations à réaliser, un plan d'expérience a été mis en œuvre. Celui-ci est présenté à la section suivante.

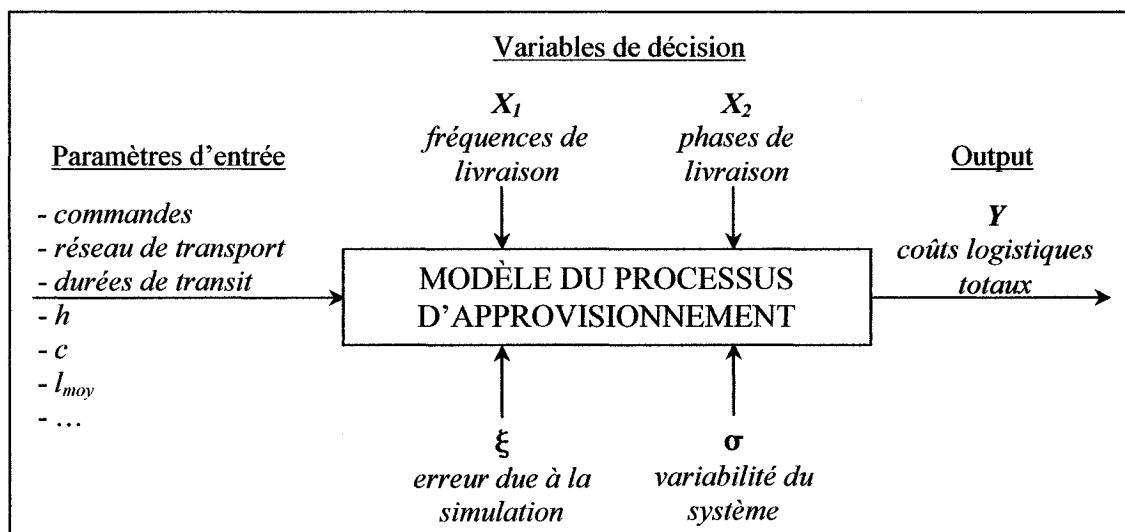


Figure 3.3 - Schématisation des facteurs influençant le processus d'approvisionnement modélisé

3.4. Plan d'expérience

Pour être en mesure de générer des résultats intéressants, les simulations doivent être réalisées en fonction des hypothèses à tester ($H1$ à $H4$) et des objectifs visés. Le tableau 3.1 détaille le plan d'expérience élaboré pour les variables et paramètres à l'étude. Ce plan comporte quatre expérimentations distinctes ($E1$ à $E4$).

La première expérimentation ($E1$) concerne les fréquences de livraison et permet de tester les hypothèses $H2$ et $H3$ (cf. section 3.3). En fait, sept simulations différentes seront effectuées en faisant varier la fréquence de livraison moyenne de 1,5 à 3 livraisons par semaine. Ainsi, sept scénarios d'approvisionnement devront être générés et testés. Il est à noter que les phases de base sont les phases utilisées par Paccar. Par exemple, pour une fréquence de trois livraisons par semaine, l'entreprise utilise généralement la phase suivante: {lundi; mercredi; vendredi}. Par

⁸ L'erreur expérimentale est l'effet combiné de σ et ξ sur la réponse Y .

ailleurs, pour les expérimentations $E1$, $E2$ et $E4$, les valeurs de h , c et l_{moy} ont été déterminées en fonction du contexte opérationnel des usines nord-américaines de Paccar en janvier 2006⁹.

Tableau 3.1 - Plan d'expérience

Variables ou paramètres à l'étude		Hypothèse(s) à tester	Plan expérimental	Simulations à réaliser
$E1$	fréquences de livraison (X_1)	$H2$ $H3$	Faire varier la fréquence moyenne de livraison entre les fournisseurs et les usines (f_{moy}) sans optimiser les phases de livraison.	- f_{moy} (livraisons/semaine) = {1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 2,75; 3} - ρ_{ij} = phases de base - $c = 1,00$ \$U.S./km - $h = 10\%$ - $l_{moy} = 1900$ km
$E2$	phases de livraison (X_2)	$H4$	Optimiser les phases de livraison (ρ_{ij}) en maintenant les fréquences (f_{ij}) constantes. Stratégies d'optimisation: 1) modifier les phases de façon à réduire la durée d'entreposage des pièces; 2) modifier les phases de façon à ce que les fournisseurs d'une même région expédient leur marchandise la (ou les) même(s) journée(s).	- $f_{ij} = 2,25$ - ρ_{ij} = varient selon les stratégies - $c = 1,00$ \$U.S./km - $h = 10\%$ - $l_{moy} = 1900$ km
$E3$	c h l_{moy}	n/a	Effectuer un design d'expérience pour déterminer l'influence des paramètres c , h et l_{moy} sur les coûts logistiques. Il s'agit de déterminer le design pour trois facteurs ayant trois modalités (valeurs possibles) chacun.	- $f_{ij} = 2,25$ - ρ_{ij} = phases de base - c (\$U.S./km) = {0,8; 1; 1,2} - h (%) = {10; 20; 30} - l_{moy} (km) = {1200; 1900; 2600}
$E4$	n/a	$H1$	Optimiser l'approvisionnement des usines de façon décentralisée (chaque usine gère ses opérations d'approvisionnement de façon indépendante).	Pour chaque usine, effectuer la simulation suivante: - $f_{moy} = 2,25$ - ρ_{ij} = base - $c = 1,00$ \$U.S./km - $h = 10\%$ - $l_{moy} = 1900$ km

La seconde expérimentation ($E2$) vise à étudier l'impact des phases de livraison sur les coûts logistiques totaux. En effet, il est possible de modifier les phases de base, c'est-à-dire d'ajouter de nouvelles phases en suivant des stratégies particulières. En fait, deux stratégies seront employées. D'abord, la première stratégie consiste à déterminer les phases de façon à limiter la durée d'entreposage des pièces, et ce, dans le but de réduire les coûts d'inventaires. La seconde stratégie vise à déterminer les phases pour que les fournisseurs d'une même région expédient

⁹ En ce qui concerne le paramètre h , Paccar utilise un coefficient de 10% pour évaluer les gains liés aux projets de réduction d'inventaires.

leurs pièces la (ou les) même(s) journée(s), afin de favoriser les opérations de consolidation. En maintenant les fréquences de livraison constantes, il sera possible d'évaluer l'impact des phases de livraison sur les coûts logistiques totaux.

La troisième expérimentation (*E3*) consiste à évaluer l'impact des paramètres h , c et l_{moy} sur les coûts logistiques. Pour ce faire, un design d'expérience a été produit. Ce design a été réalisé pour trois variables indépendantes (h , c et l_{moy}) ayant trois modalités chacune (cf. tableau 3.1), et trois variables de réponse (coûts d'inventaires (C_{inv}), coûts de transport (C_{transp}) et coûts logistiques totaux (C_{TOT})). Pour ne pas effectuer 27 (3^3) simulations différentes, un plan factoriel a été généré à l'aide du logiciel Statistica¹⁰ (cf. figure 3.4). Ce plan factoriel comprend neuf simulations. En effectuant ces simulations, il sera possible de quantifier l'impact des paramètres h , c et l_{moy} sur les variables de réponse.

Standard Run	3**(3-1) fractional factorial design, 1 block, 9 runs		
	c	h	l_{moy}
8	1,2	0,20	1200
6	1,0	0,30	1200
7	1,2	0,10	1900
1	0,8	0,10	1200
9	1,2	0,30	2600
4	1,0	0,10	2600
3	0,8	0,30	1900
5	1,0	0,20	1900
2	0,8	0,20	2600

Figure 3.4 - Plan factoriel pour l'étude des paramètres c , h et l_{moy}

Enfin, la dernière expérimentation (*E4*) vise à tester l'hypothèse $H1$ ¹¹. En optimisant les opérations d'approvisionnement de chaque usine séparément (gestion décentralisée), il sera possible d'évaluer si la gestion centralisée permet de réduire les coûts logistiques totaux, comme le soulignent les chercheurs ayant étudié la technique du CTM (cf. section 2.1). Cette dernière expérimentation permettra également de déterminer les meilleures stratégies à adopter pour gérer l'approvisionnement d'une usine qui est particulièrement éloignée de ses fournisseurs.

¹⁰ StatSoft, Inc. 2005. STATISTICA (data analysis software system). Version 7.1. www.statsoft.com.

¹¹ Rappel de l'hypothèse $H1$: Dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, une gestion centralisée de l'approvisionnement de plusieurs centres de distribution et/ou usines permet de réduire les coûts logistiques totaux de façon considérable (réduction d'au minimum 25%), en comparaison à une gestion décentralisée.

CHAPITRE 4 : DÉVELOPPEMENT DU SAD

Après avoir défini le problème, établi l'approche de modélisation, déterminé les variables et paramètres à l'étude, et élaboré le plan d'expérience, il est maintenant possible de présenter le système d'aide à la décision (SAD) qui a été développé dans le cadre de ce projet de recherche. Tout d'abord, la structure du SAD sera exposée. Ensuite, le cœur du SAD sera détaillé, c'est-à-dire la modélisation du système d'approvisionnement.

4.1. Structure du SAD

La figure 4.1 illustre la structure du SAD. Ce SAD permet de simuler les opérations logistiques liées à différents scénarios d'approvisionnement et de calculer les coûts logistiques engendrés (coûts de transport et d'inventaires) pour un horizon de planification donné. Dans ce mémoire, l'horizon de planification a été fixé à une semaine (sept jours), puisque la grande majorité des fournisseurs avec lesquels les usines de Paccar font affaire leur expédient de la marchandise au moins une fois par semaine. Par conséquent, pour analyser le comportement du système, il s'agit de simuler une semaine typique d'approvisionnement en faisant varier les différents inputs. Les besoins hebdomadaires de chaque usine auprès de chaque fournisseur sont donc connus et fixes pour tous les scénarios à simuler.

Un scénario est généré en fixant les variables de décision, c'est-à-dire les fréquences et les phases de livraison, pour chaque couple (i,j) , où (i,j) fait référence à la marchandise expédiée par un fournisseur i à une usine j , ainsi qu'en déterminant les valeurs des paramètres à l'étude, soit h , c et l_{moy} . Après avoir fixé les inputs, il s'agit d'évaluer le scénario, c'est-à-dire de simuler une semaine d'approvisionnement afin de calculer les coûts logistiques correspondants. Comme il a été mentionné, les opérations de transport et la gestion des inventaires ne sont pas modélisées dans un seul modèle mathématique. En effet, un premier modèle a été développé pour le calcul des coûts d'inventaires (cf. section 4.2), alors qu'un second modèle a été bâti pour optimiser les opérations de transport au cours de l'horizon de planification (cf. section 4.3). Ainsi, le SAD permet de déterminer, séparément, les coûts d'inventaires et de transport. C'est donc à l'aide de ses coûts que les scénarios peuvent être comparés. De plus, en analysant les résultats des scénarios testés et les inputs correspondants à ces scénarios, il est possible de générer de meilleures solutions (rétroaction).

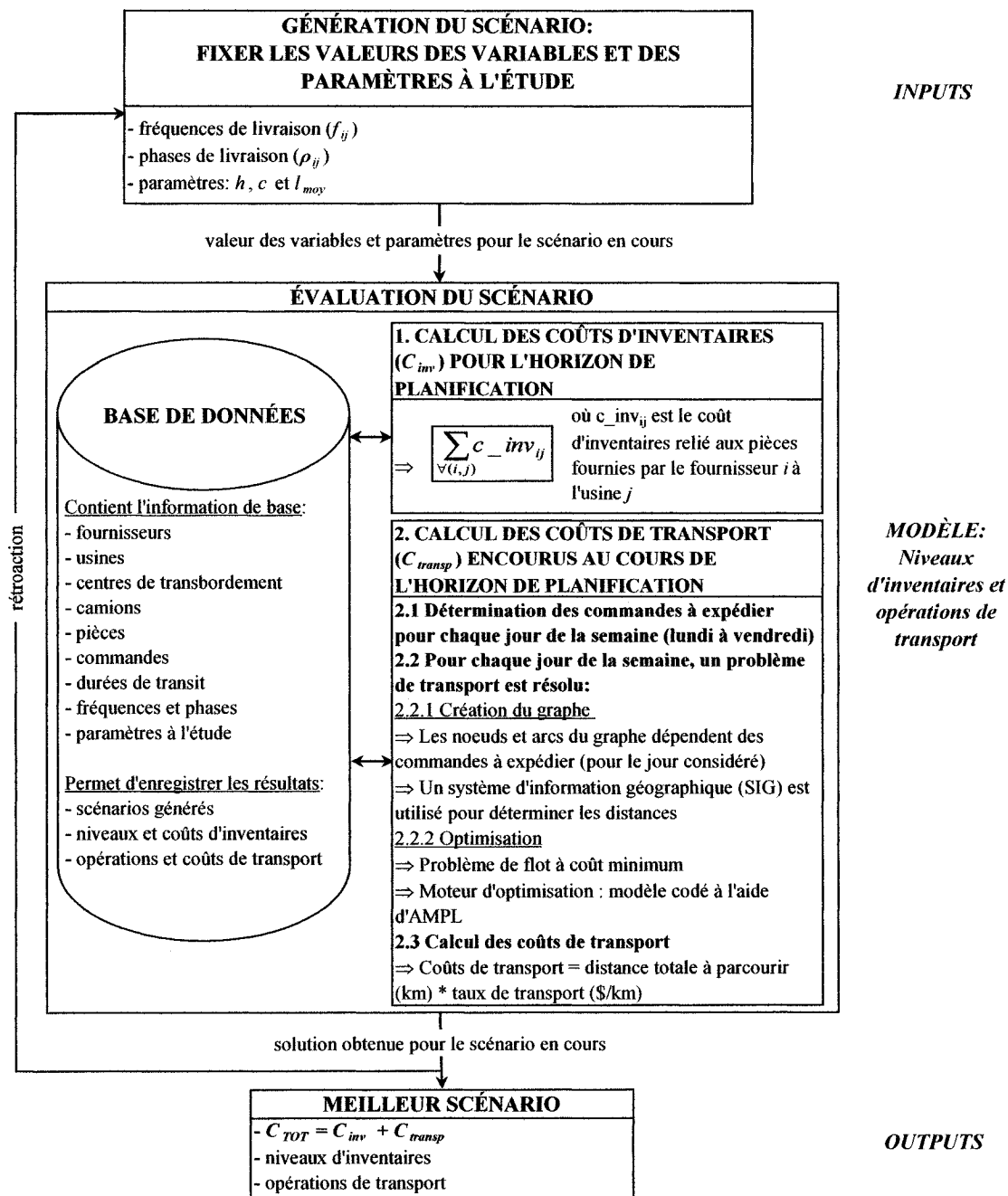


Figure 4.1 - Structure du SAD

Il est à noter que ce SAD peut être utilisé pour atteindre deux objectifs interdépendants. D'une part, en générant les scénarios selon un design d'expérience, il est possible d'analyser l'influence de certains paramètres sur le comportement du système d'approvisionnement, comme il a été détaillé à la section 3.4. D'autre part, il peut être avantageux de générer les scénarios en utilisant

une méthode de recherche locale comme, par exemple, la Recherche Tabou¹². En effet, la recherche locale est une méthode d'optimisation qui permettrait de générer diverses solutions dans le but de minimiser les coûts logistiques totaux. Il s'agirait d'évaluer les divers scénarios générés et de mémoriser la meilleure solution.

Bref, une stratégie intéressante pour optimiser globalement les opérations logistiques avec ce SAD consiste à suivre les deux étapes suivantes:

1. analyser les impacts de la variation de divers paramètres et variables de décision sur le comportement du système d'approvisionnement afin d'être en mesure de générer de bonnes solutions de départ;
2. minimiser les coûts logistiques totaux à l'aide d'une méthode de recherche locale à partir des solutions (ou scénarios) préalablement générées.

Dans ce mémoire, les expérimentations seront concentrées au niveau de l'étape 1. En effet, le plan d'expérience élaboré à la section 3.4 vise à déterminer les meilleures stratégies pour piloter un système d'approvisionnement de façon à optimiser globalement les opérations logistiques.

Avant d'expliquer en détail comment les opérations logistiques ont été modélisées, il est important d'énoncer les hypothèses qui définiront le cadre de validité des résultats qui seront obtenus à l'aide du SAD:

- la demande est considérée comme étant constante au cours de l'horizon de planification, c'est-à-dire que les pièces sont consommées par les usines de façon constante durant la semaine¹³ ;
- le prix des pièces est fixe, c'est-à-dire qu'il ne dépend pas du coût de préparation des commandes ;
- la marchandise appartient à l'acheteur dès que les pièces quittent le quai d'expédition du fournisseur (*FOB Origin*) ;
- les fournisseurs expédient de la marchandise du lundi au vendredi uniquement.

¹² La Recherche Tabou est une méthode heuristique d'optimisation consistant à explorer le voisinage d'une solution de base dans le but de minimiser la fonction objectif. La Recherche Tabou poursuit la recherche de solutions même lorsqu'un optimum local est rencontré puisqu'elle permet les déplacements qui n'améliorent pas la solution.

¹³ Cette hypothèse a été émise pour simplifier le calcul des niveaux d'inventaires. Il est à noter que la demande est variable d'une semaine à l'autre.

Il est à noter que d'autres hypothèses concernant les opérations de transport seront détaillées à la section 4.3.4.

En fonction de ces hypothèses, il a été possible de modéliser les niveaux d'inventaires en transit et en main, ainsi que les opérations de transports nécessaires pour approvisionner les usines. Cette modélisation est présentée dans les deux prochaines sections.

4.2. Modélisation des inventaires

La première étape de l'évaluation d'un scénario consiste à calculer les coûts d'inventaires. Comme il a été mentionné, les niveaux d'inventaires dépendent des fréquences et des phases de livraison. Une fois que la fréquence de livraison f_{ij} et la phase ρ_{ij} de chaque couple (i,j) ont été fixées, il est possible de calculer les coûts d'inventaires qui seront encourus par l'ensemble des usines au cours de la semaine.

D'abord, pour chaque couple (i,j) , il s'agit d'évaluer la valeur moyenne des inventaires présents dans la chaîne d'approvisionnement au cours de l'horizon de planification (\bar{I}_{ij}). Puisque les besoins de chaque usine sont connus (simulation d'une semaine typique de production), la valeur totale (v_{ij}) des pièces du fournisseur i destinées à l'usine j est connue. Par conséquent, voici comment déterminer \bar{I}_{ij} :

$$\bar{I}_{ij} = \left[\frac{v_{ij}}{f_{ij}2} + \frac{v_{ij}}{f_{ij}} \alpha_{ij} \right] + \left[\frac{v_{ij}}{f_{ij}} \frac{f_{ij} t_{ij}}{7} \right] = \frac{v_{ij}}{f_{ij}} \left(\frac{1}{2} + \alpha_{ij} \right) + \frac{v_{ij} t_{ij}}{7} \quad (4.1)$$

où	\bar{I}_{ij}	valeur moyenne, au cours de la semaine, des inventaires (\$) liés au couple (i,j)
	f_{ij}	fréquence de livraison (nb. livraisons/semaine) liée au couple (i,j)
	t_{ij}	durée de transit (jours) liée au couple (i,j)
	v_{ij}	valeur totale de la marchandise (\$) nécessaire pour couvrir les besoins de l'usine j concernant les pièces du fournisseur i au cours de la semaine
	α_{ij}	coefficient utilisé pour ajuster le calcul des inventaires en main

Dans la formule 4.1, $v_{ij}/f_{ij}*(0,5+\alpha_{ij})$ est la valeur moyenne des inventaires en main, alors que $v_{ij}*t_{ij}/7$ est la valeur moyenne des inventaires en transit. Pour expliquer le calcul des inventaires en transit, il suffit de présenter un exemple. Supposons que la valeur totale des pièces à expédier par le fournisseur i à l'usine j durant la semaine est de 14000\$ et que la durée de transit est de 2

jours. En considérant ces données, la valeur moyenne des inventaires en transit est: $14000\$/\text{semaine} * 2 \text{ jours} / 7 \text{ jours/semaine} = 4000\$$.

Par contre, le calcul des inventaires en main est plus complexe. Pour une entreprise qui produit 365 jours/an, la valeur moyenne des inventaires en main est $v_{ij}/f_{ij} * 0,5$ (v_{ij}/f_{ij} est divisé par deux étant donné que la demande est considérée comme étant constante durant l'horizon de planification). Par contre, de nombreuses entreprises ne sont pas en opération la fin de semaine. Ainsi, elles doivent supporter des inventaires au cours de cette période. Dans la formule 4.1, le terme $v_{ij}/f_{ij} * \alpha_{ij}$ a été ajouté, entre autres, pour tenir compte des variations d'inventaires engendrées par les fins de semaines. De plus, le coefficient α_{ij} peut aussi être utilisé pour considérer les variations d'inventaires générées par la variabilité de la demande à l'intérieur de l'horizon de planification et par les livraisons hâtives et/ou tardives. Il est donc possible d'estimer α_{ij} en additionnant deux coefficients:

$$\alpha_{ij} = \alpha_{ij}^1 + \alpha_{ij}^2 \quad (4.2)$$

où α_{ij}^1 coefficient utilisé pour tenir compte des inventaires à supporter la fin de semaine et pour considérer le déphasage, au niveau des livraisons, créé par les fins de semaines

α_{ij}^2 coefficient utilisé pour considérer l'aspect aléatoire des variations d'inventaires (variabilité de la demande à l'intérieur de l'horizon de planification, variations dues aux livraisons hâtives/tardives, pièces endommagées, etc.)

Le coefficient α_{ij}^2 peut être estimé, entre autres, en fonction de l'historique des livraisons et de la variabilité de la demande. Dans ce mémoire, la valeur de α_{ij}^2 sera fixée à 0,1 pour tous les couples (i,j) afin de simplifier les calculs.

Contrairement au coefficient α_{ij}^2 , α_{ij}^1 peut être déterminé de façon analytique. Illustrons le calcul de α_{ij}^1 par un exemple. Supposons que $v_{ij} = 14000\$$ (demande hebdomadaire), $t_{ij} = 2$ jours, $f_{ij} = 2$ livraisons/semaine et que ces livraisons doivent être reçues à l'usine le mardi matin et le vendredi matin (ρ_{ij}).

La figure 4.2 représente la variation, pour deux semaines de production, du niveau d'inventaires en main à l'usine. La courbe *Production les week-ends* expose un système de production dans lequel le fournisseur et l'usine sont en opération la fin de semaine (valeur moyenne des

inventaires en main = $v_{ij}/f_{ij} * 0,5$), alors que la courbe *Fermeture les week-ends* représente les inventaires en main lorsque le fournisseur expédie la marchandise du lundi au vendredi uniquement et que l'usine est fermée la fin de semaine (valeur moyenne des inventaires en main = $v_{ij}/f_{ij} * (0,5 + \alpha_{ij}^1)$). Il est à noter que les niveaux d'inventaires représentés dans ce graphique ne tiennent pas compte du coefficient α_{ij}^2 .

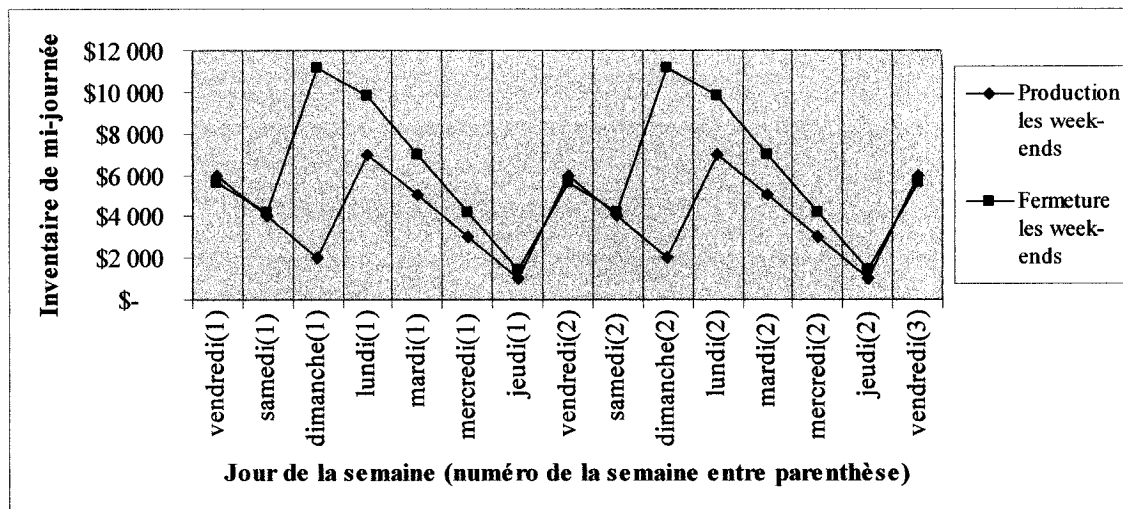


Figure 4.2 - Variation de la valeur des inventaires en main (exemple)¹⁴

Comme il est possible de le constater, le fait que le fournisseur et l'usine soient fermés durant la fin de semaine engendre une augmentation de la valeur moyenne des inventaires en main, et ce, pour deux raisons. Premièrement, aucune pièce n'est consommée durant les week-ends. Ainsi, les inventaires restant le vendredi soir sont entreposés au minimum jusqu'au lundi. Deuxièmement, les week-ends provoquent un déphasage au niveau des livraisons, ce qui fait en sorte que certaines commandes sont reçues en avance. Par exemple, avec $t_{ij} = 2$ jours et $\rho_{ij} = \{\text{mardi; vendredi}\}$, le fournisseur devrait expédier les pièces le dimanche (pour le mardi) et le mercredi (pour le vendredi). Par contre, ce dernier ne peut expédier que les jours de semaine. Par conséquent, la commande prévue pour le mardi est expédiée le vendredi (et non le dimanche) et arrive à l'usine le dimanche. Bref, le stock est entreposé deux jours de plus que prévu, ce qui augmente l'inventaire moyen.

¹⁴ En ce qui concerne la courbe *Fermeture les week-ends*, le calcul des inventaires de mi-journée est le suivant: inventaire de mi-journée pour le jour i = inventaire de mi-journée pour le jour $(i-1)$ - consommation journalière (s'il y a lieu) + réception de marchandise (s'il y a lieu). Par exemple, le calcul de l'inventaire de mi-journée pour le jour *vendredi(2)* est: $1400\$ - 2800\$ + 7000\$ = 5600\$$.

En ce qui concerne l'exemple de la figure 4.2, l'inventaire moyen pour le cas *Production les week-ends* est de $14000\$/\text{semaine} / 2 \text{ livraisons/semaine} * 0,5 = 3500\%$, tandis qu'il est de 6200% pour le cas *Fermeture les week-ends*, ce qui représente une augmentation de près de 80%. Ainsi, puisque $v_{ij}/f_{ij} * (0,5 + \alpha'_{ij}) = 6200\%$, $\alpha'_{ij} = 0,39$. Le coefficient α_{ij} n'est donc pas négligeable.

Après avoir calculé la valeur moyenne des inventaires (\bar{I}_{ij}) pour chaque couple (i,j) , il est possible d'estimer le coût de supporter ces inventaires durant l'horizon de planification ($c_{inv_{ij}}$). Pour ce faire, il s'agit d'estimer le paramètre h , qui représente le pourcentage de la valeur des pièces qui est imputé comme coût d'inventaires. Il est à noter que ce pourcentage est basé sur une année complète d'entreposage. Ainsi, les coûts d'inventaires pour un couple (i,j) durant l'horizon de planification sont:

$$c_{inv_{ij}} = \frac{7}{365} h \bar{I}_{ij} \quad (4.3)$$

Enfin, les coûts d'inventaires totaux sont:

$$C_{inv} = \sum_{\forall(i,j)} c_{inv_{ij}} \quad (4.4)$$

Bref, pour chaque scénario, les fréquences et les phases de livraison déterminent les niveaux d'inventaires. C'est donc en testant divers scénarios, c'est-à-dire en faisant varier les fréquences et les phases de livraison, qu'il sera possible de constater la variation des coûts d'inventaires. En plus de la modélisation des niveaux d'inventaires, le SAD permet de modéliser les opérations de transport. Ce modèle est présenté à la section suivante.

4.3. Modélisation des opérations de transport

Le SAD permet d'optimiser les opérations de transport liées à un scénario d'approvisionnement particulier. En effet, le modèle mathématique développé minimise la distance totale parcourue par les camions pour approvisionner les usines durant l'horizon de planification.

Comme l'indique la figure 4.1, la première étape liée à la modélisation des opérations de transport consiste à déterminer les commandes qui doivent être expédiées (des fournisseurs aux usines) à chaque jour de la semaine. Pour un couple (i,j) , les jours d'expédition sont déduits en fonction de la phase de livraison (ρ_{ij}) et de la durée de transit (t_{ij}), comme il a été montré dans l'exemple de la section précédente. De plus, la valeur (\$), le poids (kg) et le volume (m^3) de

chaque commande sont calculés en fonction de la fréquence de livraison (f_{ij}). Puisque la demande est considérée comme étant constante durant l'horizon de planification, toutes les commandes du couple (i,j) ont la même valeur. Ainsi, pour déterminer la valeur d'une commande, il suffit de diviser la valeur totale (v_{ij}) des pièces nécessaires pour couvrir l'horizon de planification par la fréquence de livraison (f_{ij}). Le même calcul est effectué pour déterminer le poids et le volume des commandes.

En mémorisant les commandes, ainsi que les jours d'expédition pour chaque couple (i,j) , il devient possible de résoudre un problème de transport pour chaque jour de la semaine, c'est-à-dire du lundi au vendredi. D'abord, un graphe modélisant le déplacement des commandes entre les différentes entités du réseau de transport (fournisseurs, transporteurs, centres de transbordement et usines) est construit en fonction des commandes à expédier pour la journée considérée. Par la suite, un problème de flot à coût minimum est résolu afin de minimiser la distance à parcourir pour livrer toutes les commandes. Enfin, les coûts de transport encourus au cours de l'horizon de planification sont calculés en multipliant la distance totale qui doit être parcourue par le taux de transport.

4.3.1. Problème de flot à coût minimum

Suite à la revue de littérature, il a été possible de constater que les problèmes de flot à coût minimum s'apprêtent bien à la modélisation des opérations de transport pour une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, puisque ce type d'approche permet de modéliser des réseaux de transport complexes et de résoudre des problèmes de grande taille. C'est donc un problème de flot à coût minimum qui a été incorporé au SAD pour modéliser les opérations de transport. En effet, une approche intéressante pour modéliser ces opérations consiste à bâtir un graphe dans lequel les flots représentent les pièces à livrer, alors que les nœuds symbolisent les différents maillons de la chaîne d'approvisionnement (fournisseurs, transporteurs, centres de transbordement et usines). Un chemin dans le graphe modélise donc le déplacement des pièces dans le réseau de transport. Cependant, il n'est pas nécessaire de modéliser le déplacement de chacune des pièces. En fait, pour ne pas augmenter inutilement la taille du problème, il est préférable de modéliser le déplacement des commandes. Pour ce faire, il faut supposer que les pièces du fournisseur i destinées à l'usine j pour le jour x sont toutes

expédiées dans la même remorque, sauf si, évidemment, celles-ci sont trop lourdes ou volumineuses pour être regroupées dans une seule remorque.

Bref, les opérations de transport sont modélisées par un problème de flot à coût minimum dans lequel les flots sont les commandes qui doivent être expédiées au cours de la journée considérée. De plus, les coûts sont les distances séparant les nœuds du réseau et l'objectif consiste à minimiser la distance totale à parcourir pour approvisionner les usines.

4.3.2. Construction du graphe

Comme il a été mentionné, le graphe représente le réseau de transport. Par conséquent, sa structure dépend des techniques de transport employées pour acheminer les pièces des fournisseurs aux usines. En ce qui concerne la chaîne d'approvisionnement modélisée dans ce mémoire (cf. section 1), les techniques suivantes sont utilisées:

1. transport direct d'un fournisseur à une usine ;
2. transport via un centre de transbordement ;
3. consolidation des pièces de plusieurs fournisseurs situés dans une même région ;
4. consolidation des pièces destinées à plusieurs usines ;
5. combinaison des quatre techniques précédentes¹⁵.

Le graphe doit donc modéliser toutes ces techniques de transport. Afin d'illustrer le problème, il s'avère intéressant de détailler la construction du graphe à l'aide d'un exemple. Considérons une chaîne d'approvisionnement ayant les caractéristiques suivantes:

- trois usines doivent être approvisionnées ($U1$, $U2$, $U3$) ;
- trois fournisseurs produisent les pièces ($F1$, $F2$, $F3$) ;
- deux centres de transbordement sont disponibles ($C1$, $C2$).

De plus, supposons que cinq commandes doivent être livrées:

1. $O1$: ($F1$, $U1$)¹⁶ ;
2. $O2$: ($F1$, $U2$) ;
3. $O3$: ($F2$, $U1$) ;

¹⁵ Par exemple, il est possible de consolider les pièces de plusieurs fournisseurs situés dans une même région et d'acheminer ces pièces à un centre de transbordement. À ce centre de transbordement, les pièces destinées à une usine particulière pourront être consolidées et livrées à cette usine.

¹⁶ La commande $O1$ concerne les pièces du fournisseur $F1$ destinées à l'usine $U1$.

4. $O4: (F3, U2)$;
5. $O5: (F3, U3)$.

La figure 4.3 illustre le graphe correspondant à cet exemple. En fait, ce graphe représente tous les chemins que peuvent emprunter les commandes (ou les flots) $O1$ à $O5$ pour être livrées à leur usine de destination ($U1, U2$ ou $U3$).

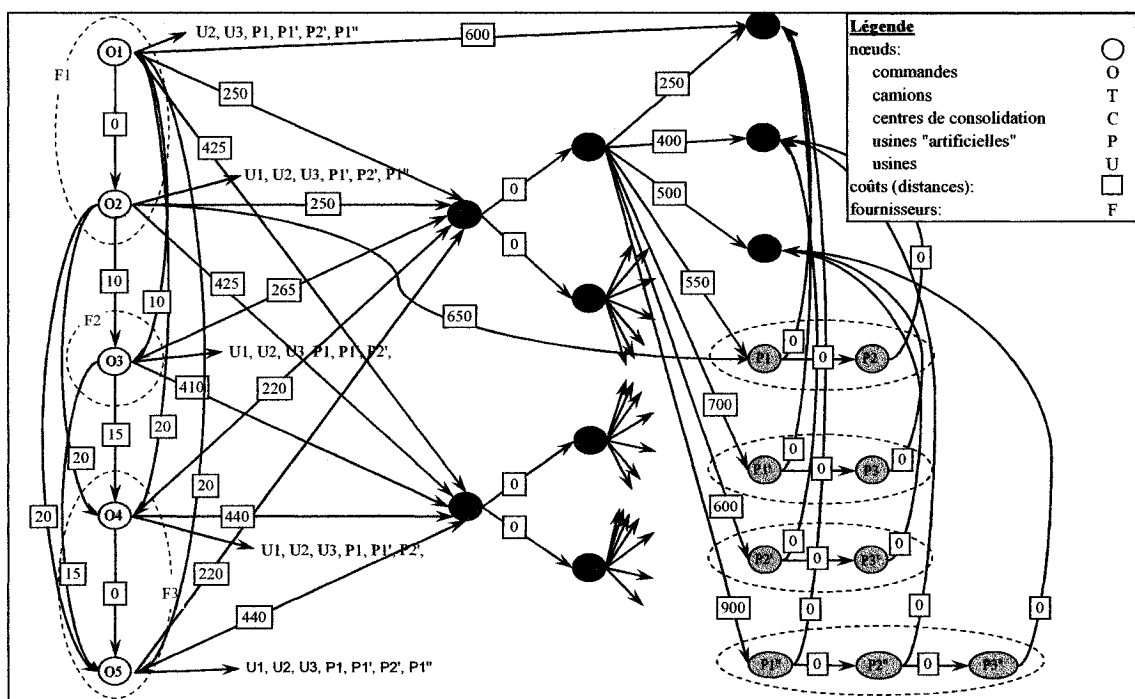


Figure 4.3 - Exemple de graphe modélisant le réseau de transport

Tout d'abord, ce graphe comprend un nœud pour chaque commande à livrer ($O1$ à $O5$). Pour chacun de ses nœuds, un flot est généré. Ce flot contient toutes les informations de la commande correspondante: le fournisseur, l'usine qui a effectué la commande, ainsi que la valeur (\$U.S.), le volume (m^3) et le poids (kg) de la marchandise. Comme il est possible de le constater, il n'est pas nécessaire d'ajouter des nœuds pour représenter les fournisseurs puisque les commandes d'un même fournisseur sont reliées par un arc de coût nul (il est donc possible de consolider plusieurs commandes d'un même fournisseur sans générer de coûts). De plus, pour modéliser la consolidation de commandes provenant de différents fournisseurs, des arcs liant les nœuds O ont

été ajoutés¹⁷. Le coût inscrit sur ces arcs correspond à la distance (km) séparant les fournisseurs en question.

Cette première partie du graphe permet de former des expéditions contenant des commandes d'un ou de plusieurs fournisseurs, et ce, en respectant la capacité des camions. Ces expéditions peuvent être envoyées vers trois types de nœuds:

1. les usines ($U1$ à $U3$): pour modéliser une expédition directe d'un fournisseur vers une usine (le coût de l'arc est la distance séparant le fournisseur de l'usine) ;
2. les usines « artificielles » ($P1$, $P1'$, $P2'$, $P1''$): pour modéliser une expédition d'un fournisseur à plus d'une usine ;
3. les centres de transbordement ($C1$, $C2$): pour modéliser une expédition d'un fournisseur vers un centre de transbordement (le coût de l'arc est la distance séparant le fournisseur du centre de transbordement).

En ce qui concerne les expéditions contenant de la marchandise destinée à plus d'une usine, les nœuds P sont nécessaires pour répartir les commandes vers les bonnes usines. En fait, les nœuds P sont nommés « artificiels » car ils ne représentent pas des usines réelles. Par exemple, une expédition entrant dans le nœud $P1''$ est transportée par un camion qui visitera les trois usines. En liant, par un arc de coût nul, les nœuds $P1''$, $P2''$ et $P3''$ à leur usine respective, il est possible de modéliser la livraison des différentes commandes formant cette expédition. Par ailleurs, le coût de l'arc liant un nœud O ou un nœud T à un nœud P est la distance correspondant au plus court chemin à parcourir pour visiter les usines modélisées par les nœuds P . Par exemple, le coût de l'arc liant les nœuds $O4$ et $P1''$ est le plus court chemin pour livrer une expédition partant du fournisseur $F3$ et contenant des commandes pour les usines $U1$, $U2$ et $U3$. Les nœuds $P1''$, $P2''$ et $P3''$ sont donc liés par des arcs de coût nul.

Enfin, pour être en mesure de former des expéditions avec les commandes passant par les centres de transbordement, les nœuds $C1$ et $C2$ sont liés à des nœuds T représentant les camions. Par conséquent, une expédition formée en fonction des commandes passant par un arc $C-T$ doit

¹⁷ Il est à noter que, dans le graphe, tous les nœuds représentant les commandes d'un fournisseur doivent être placés les uns à la suite des autres, et ce, pour éviter de passer deux fois par un même fournisseur lors d'une tournée de ramassage. Par exemple, dans le graphe de la figure 4.3, si les commandes $O1$ et $O5$ étaient inversées, il serait possible de commencer une tournée par le fournisseur $F3$, d'aller ensuite au fournisseur $F1$ et de revenir au fournisseur $F3$, ce qui est illogique. Cette règle d'ordonnancement dans le graphe est nécessaire puisque des liens unidirectionnels sont utilisés (cf. section 4.3.4).

respecter la capacité du camion. Il est à noter que le nombre de camions liés à un centre de transbordement peut être déterminé en estimant le volume de commandes qui y seront expédiées.

Bref, comme il est possible de le constater, le graphe doit être généré en fonction des commandes et du nombre de camions disponibles en aval des centres de transbordement. Pour ce qui est des distances, elles peuvent être déterminées à partir d'une matrice contenant les distances séparant chacun des nœuds du réseau.

4.3.3. Modèle mathématique

Le graphe détaillé à la section précédente schématise le problème de flot à coût minimum. Pour être en mesure de résoudre ce problème, il est nécessaire de développer un modèle mathématique. Voici le programme linéaire qui a été développé:

$$\min \sum_{\forall (i,j) \in \beta} L_{ij} y_{ij} \quad \text{minimiser la distance totale} \quad (4.5)$$

s.c.

$$\sum_{\forall (i,j) \in \delta} x_{ij}^i = 1, \quad \forall i \in \gamma \quad \text{génération des flots} \quad (4.6)$$

$$\sum_{\forall (i,j) \in \delta} x_{ij}^k = \sum_{\forall (j,l) \in \delta} x_{jl}^k, \quad \forall j \in \gamma, \forall k \in \gamma | k \neq j \quad \text{conservation de flot – nœuds } O \quad (4.7)$$

$$\sum_{\forall (i,j) \in \delta} x_{ij}^k = \sum_{\forall (j,l) \in \delta} x_{jl}^k, \quad \forall j \in \lambda, \forall k \in \gamma \quad \text{conservation de flot – nœuds } C, T \text{ et } P \quad (4.8)$$

$$\sum_{\forall (i,j) \in \delta} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in \mu, \forall k \in \gamma(j) \quad \text{livrer les commandes aux bonnes usines} \quad (4.9)$$

$$\sum_{\forall k \in \gamma} r^k x_{ij}^k \leq R, \quad \forall (i,j) \in \tau, \forall (i,j) \in \omega \quad \text{capacité du camion: volume} \quad (4.10)$$

$$\sum_{\forall k \in \gamma} w^k x_{ij}^k \leq W, \quad \forall (i,j) \in \tau, \forall (i,j) \in \omega \quad \text{capacité du camion: poids} \quad (4.11)$$

$$\sum_{\forall k \in \gamma} x_{ij}^k \leq M y_{ij}, \quad \forall (i,j) \in \beta \quad \text{déterminer les valeurs des variables } y_{ij} \quad (4.12)$$

$$\sum_{\forall (i,j) \in \delta} y_{ij} = 1, \quad \forall i \in \gamma, \forall i \in \phi \quad \text{empêcher la division des expéditions} \quad (4.13)$$

$$\sum_{\forall (i,j) \in \delta} y_{ij} \leq 1, \quad \forall j \in \gamma \quad \text{une seule expédition entrant un nœud } O \quad (4.14)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in \delta, \forall k \in \gamma \quad (4.15)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in \beta \quad (4.16)$$

où r^k volume occupé par la commande k (m³)
 w^k poids de la commande k (kg)

R	capacité du camion: volume (m^3)
W	capacité du camion: poids (kg)
L_{ij}	distance entre les noeuds i et j (en km)
M	représente un nombre élevé (ex.: 100)
γ	ensemble des commandes
μ	ensemble des usines
$\gamma(j)$	ensemble des commandes effectuées par l'usine j
φ	ensemble des camions
λ	ensemble des nœuds pour lesquels la conservation de flot s'applique (excluant les nœuds O) : nœuds C , T et U
δ	ensemble contenant tous les arcs du graphe
β	ensemble des arcs ayant un coût > 0 , c'est-à-dire les arcs qui modélisent le déplacement des camions
τ	ensemble des arcs reliés aux commandes: $O-O$, $O-C$, $O-P$, $O-U$
ϖ	ensemble des arcs qui entrent dans les nœuds T (les camions)
x_{ij}^k	variable binaire égale à 1 si la commande k passe par l'arc (ij) , 0 sinon
y_{ij}	variable binaire égale à 1 si au moins une commande passe par l'arc (ij) , 0 sinon

Comme il a été mentionné, l'objectif de ce programme linéaire est de minimiser la distance totale à parcourir pour livrer toutes les commandes (4.5). La première série de contraintes (4.6) sert à générer les flots, c'est-à-dire que pour chaque nœud O , il doit y avoir un flot sortant pour la commande correspondante. Les contraintes 4.7 et 4.8 assurent la conservation des flots dans le graphe. Pour les nœuds O (les commandes), la conservation de flot s'applique pour tous les flots k à l'exception, évidemment, du flot généré à chaque commande. C'est pourquoi deux séries de contraintes ont été nécessaires. De plus, les contraintes 4.9 ont été ajoutées pour forcer les commandes à être livrées aux bonnes usines. Par exemple, si l'usine $U3$ a effectuée la commande $O2$, il doit y avoir une et une seule variable x_{U3}^{O2} égale à 1. Pour ce qui est des contraintes 4.10 et 4.11, elles assurent que la capacité des camions soit respectée, tant au niveau du volume que du poids. Puis, les contraintes 4.12 sont incluses dans le modèle pour déterminer les arcs empruntés par les camions (variables y_{ij}) et, ainsi, être en mesure de calculer la distance totale parcourue. Ensuite, pour éviter la division des expéditions, les contraintes 4.13 ont été nécessaires. En effet, ces contraintes assurent que les commandes qui quittent un nœud O ou T empruntent toutes le même arc. Finalement, les contraintes 4.14 servent à empêcher que plus d'une expédition entre dans un nœud O . Sans ces contraintes, il serait possible de consolider

différentes expéditions chez un fournisseur, alors que cette stratégie de transport n'est pas employée dans la chaîne d'approvisionnement modélisée. Par ailleurs, les contraintes 4.15 et 4.16 assurent la binarité des variables x_{ij}^k et y_{ij} .

4.3.4. Hypothèses de validité du modèle

Naturellement, pour valider le modèle détaillé à la section précédente, quelques hypothèses ont dû être émises. Ces hypothèses permettent à la fois de circonscrire le champ d'application du modèle et de limiter la complexité de celui-ci. En plus des hypothèses énoncées à la section 4.1, les hypothèses suivantes doivent être prises en compte:

- la durée de transit est fixe pour un couple (i,j) , c'est-à-dire que cette durée ne dépend pas des stratégies de transport employées (transport direct, consolidation, transbordement, *etc.*)¹⁸ ;
- aucune fenêtre de temps n'est considérée pour le ramassage des pièces chez le fournisseur ou la livraison des commandes à l'usine ;
- le volume maximal d'un chargement (R) est calculé en fonction du pourcentage du volume total d'une remorque qui peut être utilisé, et ce, en tenant compte du fait que certains contenants ou palettes ne peuvent être empilés ;
- un seul type de camion est disponible ;
- dans le graphe, la distance séparant le nœud i du nœud j est égale à la distance du nœud j au nœud i ($L_{ij} = L_{ji}$) ;
- un seul taux de transport est considéré (les expéditions TL et LTL ne sont pas différenciées) ;
- les liens entre les nœuds O sont unidirectionnels¹⁹.

¹⁸ À première vue, cette hypothèse peut sembler illogique. Toutefois, ce n'est pas le cas puisqu'elle a été émise en tenant compte de deux facteurs importants. D'une part, il s'avère peut fréquent de voir une partie des commandes du couple (i,j) livrée par transport direct, alors que l'autre partie implique des opérations de consolidation ou de transbordement. Ainsi, pour le couple (i,j) , il s'agit d'estimer la durée de transit qui correspond à la stratégie de transport employée dans la majorité des cas. D'autre part, dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, les durées de transit sont calculées en terme de jours. Ainsi, la différence entre la durée de transit nécessaire pour livrer une commande directement d'un fournisseur à une usine et la durée de transit nécessaire lorsque cette commande est consolidée avec des commandes d'autres fournisseurs n'est pas toujours considérable.

¹⁹ Par exemple, dans le graphe présenté à la figure 4.3, un flot peut se rendre de la commande $O1$ à $O5$, mais pas de $O5$ à $O1$.

Il s'avère intéressant de s'attarder à cette dernière hypothèse. En fait, les liens unidirectionnels n'ont aucun impact sur la fonction objectif lorsque seules les commandes de deux fournisseurs différents sont consolidées, étant donné que $L_{ij} = L_{ji}$. Par contre, lorsque plus de deux fournisseurs doivent être visités, ces liens deviennent contraignants. Prenons l'exemple de la figure 4.4. Dans cette figure, les liens unidirectionnels entre 3 commandes ($O1$, $O2$, $O3$) sont représentés (la commande $O1$ est liée au fournisseur $F1$, la commande $O2$ au fournisseur $F2$ et la commande $O3$ au fournisseur $F3$).

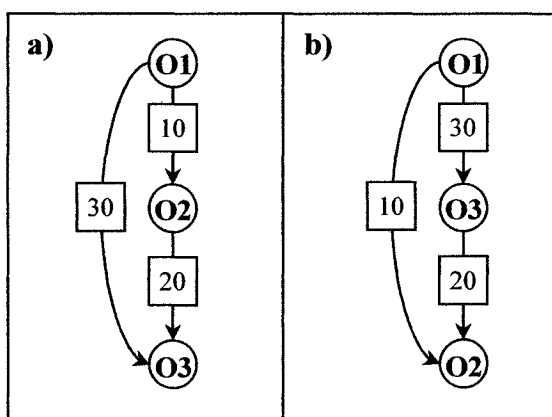


Figure 4.4 - Représentation de l'impact des liens unidirectionnels entre les commandes

La distance totale à parcourir pour consolider les trois commandes est de 30 km pour l'exemple a), alors qu'elle est de 50 km pour l'exemple b). Il est évident que le plus court chemin consiste à visiter le fournisseur $F1$, ensuite $F2$ et de terminer par $F3$. Par contre, les liens unidirectionnels de l'exemple b) ne permettent pas ce chemin. Ainsi, un graphe contenant des liens unidirectionnels entre les commandes ne permet pas toujours de trouver le plus court chemin pour consolider les commandes de plusieurs fournisseurs.

Donc, à ce niveau, des liens bidirectionnels semblent plus avantageux. Toutefois, l'ajout de tels liens augmenterait de beaucoup le nombre de variables du problème (cf. section 4.3.5). C'est pourquoi des liens unidirectionnels ont été préférés aux liens bidirectionnels. D'ailleurs, il est important de constater que la consolidation de commandes entre fournisseurs est habituellement réalisée pour des fournisseurs situés dans une même région. Par conséquent, même si le plus court chemin n'est pas trouvé pour consolider les commandes entre les fournisseurs, cela n'a pas un impact important sur la distance totale à parcourir pour livrer les pièces à destination. Dans l'exemple de la figure 4.4, supposons que les trois commandes sont destinées à une même usine

et que les fournisseurs *F1* à *F3* sont situés à environ 800 km de cette usine. Selon ces hypothèses, la distance totale à parcourir pour livrer les trois commandes est de 830 km pour l'exemple a), alors qu'elle est de 850 km pour l'exemple b), ce qui représente une différence de 2,4% seulement. Bref, dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, il est suffisant d'utiliser des liens unidirectionnels pour modéliser la consolidation des commandes entre les fournisseurs.

Bien que les hypothèses présentées dans cette section permettent de réduire la complexité du modèle, la taille des problèmes à résoudre demeure importante, comme il sera discuté à la section suivante.

4.3.5. Taille du problème de transport

La formulation du problème de flot à coût minimum présentée à la section précédente permet de modéliser un réseau de transport complexe. Toutefois, la structure du graphe fait en sorte que la taille du problème à résoudre est proportionnelle au nombre de commandes qui doivent être livrées (cf. tableau 4.1). Par exemple, supposons que 70 commandes doivent être expédiées à quatre usines différentes et que deux centres de transbordement sont disponibles dans le réseau de transport. De plus, à chaque centre de transbordement, 10 camions peuvent être utilisés, au besoin. Le tableau 4.1 expose la taille du problème correspondant à cet exemple. En fait, ce problème comporte 275065 variables et 19555 contraintes. Le temps nécessaire pour résoudre un tel problème se compte en nombre d'heures ou de jours, tout dépendamment de la puissance de l'ordinateur utilisé. Pour être en mesure de développer un SAD permettant de tester plusieurs scénarios d'approvisionnement en un court laps de temps, il faut indéniablement réduire la taille du problème. Pour ce faire, plusieurs stratégies peuvent être employées. C'est pourquoi un processus de réduction de la taille du graphe a été développé. Le tableau 4.2 résume les différentes étapes de ce processus.

En fait, ce processus a été développé de façon à réduire considérablement la taille du problème sans augmenter, ou presque, l'erreur expérimentale. Pour ce faire, il s'agissait de réduire considérablement le nombre de variables en limitant le nombre d'arcs dans le graphe.

Tableau 4.1 - Taille du problème de transport (exemple)

Caractéristiques du problème	Quantité
Commandes	70
Nœuds	121
Arcs	3875 ²⁰
Variables	275 065
x_{ij}^k	271 250 ²¹
y_{ij}	3 815
Contraintes	19 555

Tableau 4.2 - Processus de réduction de la taille du graphe

Étape	Stratégie	Mise en œuvre	Impact sur l'erreur expérimentale
1	Réduction du nombre d'arcs <i>O-O</i>	Ne pas créer les arcs reliant des commandes liées à deux fournisseurs trop éloignés.	Négligeable
2	Élimination des arcs <i>O-U</i> et <i>O-P</i> inutiles	Éliminer les arcs qui ne représentent pas un chemin possible pour les flots.	Aucun
3	Réduction du nombre de nœuds <i>P</i>	Éliminer les combinaisons d'usines qui engendrent des distances trop importantes à parcourir.	Négligeable
4	Élimination des nœuds <i>T</i>	Modifier la structure du graphe: - éliminer les nœuds <i>T</i> ; - relaxer les contraintes de capacité des camions ; - ajuster la fonction objectif.	Dépend du volume de marchandise expédié aux usines via les centres de transbordement

Tout d'abord, la première étape de ce processus consiste à réduire le nombre d'arcs *O-O*, puisque ces arcs représentent la majorité des arcs du graphe. En effet, dans le tableau 4.1, 63% des arcs totaux relient deux commandes. Comme il a été mentionné à la section précédente, la consolidation des commandes de plusieurs fournisseurs est, généralement, réalisée pour des fournisseurs situés dans une même région. Ainsi, pour réduire considérablement le nombre d'arcs *O-O*, il suffit de déterminer une distance maximale L_{max} au-delà de laquelle ces arcs ne sont pas créés. Cette stratégie peut réduire le nombre d'arcs *O-O* de 60% à 90% environ,

²⁰ Il est à noter que 63% de ces arcs sont des arcs reliant les commandes (arcs *O-O*).

²¹ Pour chaque arc (i,j) , il y a k variables x_{ij}^k : 3875 arcs * 70 commandes = 271250 variables x_{ij}^k .

dépendamment de la disposition géographique des fournisseurs dans le réseau de transport. L'élimination de ces arcs ne devrait pas augmenter l'erreur expérimentale sauf si, en réalité, les commandes de deux fournisseurs éloignés doivent être consolidées pour une raison quelconque. Dans un tel cas, il est possible de créer l'arc (ou les arcs) correspondant(s) et de forcer certaines variables x_{ij}^k pour qu'elles soient égales à 1.

La seconde étape du processus de réduction de la taille du graphe concerne les arcs $O-U$ et $O-P$. Dans le tableau 4.1, ces arcs représentent 25% des arcs totaux. Toutefois, ces arcs ne sont pas tous utiles. Par exemple, dans le graphe illustré à la figure 4.3, la commande $O3$ a été effectuée par l'usine $U1$. Par conséquent, les arcs $O3-U2$, $O3-U3$ et $O3-P2'$ peuvent être éliminés puisqu'ils ne représentent pas des chemins possibles pour la commande $O3$.

Il est aussi possible de réduire la taille du graphe en éliminant certaines combinaisons de nœuds artificiels P . En effet, ces nœuds ont été ajoutés au graphe pour modéliser la livraison de plusieurs commandes consolidées dans une remorque et destinées à plus d'une usine. La troisième étape du processus consiste donc à éliminer toute combinaison de nœuds artificiels P qui engendre une tournée trop longue (en distance et/ou en temps). Dans un système d'approvisionnement en JAT, il n'est pas avantageux d'effectuer des tournées de ramassage ou de livraison (*milk runs*) trop longues, car cela augmente la durée de transit des commandes. Par exemple, dans le graphe illustré à la figure 4.3, il est possible d'éliminer, entre autres, les nœuds $P1''$, $P2''$ et $P3''$, puisque la distance à parcourir pour livrer des commandes à ces trois usines en une seule tournée serait trop élevée.

Enfin, la dernière étape du processus de réduction de la taille du graphe consiste à modifier la structure du graphe en éliminant les nœuds T symbolisant les camions, comme l'illustre la figure 4.5. L'élimination de ces nœuds permet de réduire considérablement le nombre d'arcs et, par le fait même, le nombre de variables. Plus le nombre de camions est élevé dans le graphe initial, plus cette stratégie est efficace. Étant donné que la structure du graphe est modifiée, le programme linéaire 4.5 à 4.16 doit être ajusté. Voici le programme linéaire correspondant au graphe dans lequel les nœuds T ont été éliminés:

$$\min \sum_{\forall (i,j) \in \beta^1} L_{ij} y_{ij} + \sum_{\forall (i,j) \in \beta^2} L_{ij} z_{ij} \quad \text{minimiser la distance totale} \quad (4.17)$$

S.C.

4.6 à 4.9, 4.14

$$\sum_{\forall k \in \gamma} r^k x_{ij}^k \leq R, \quad \forall (i,j) \in \beta^1 \quad \text{capacité des camions: volume} \quad (4.18)$$

$$\sum_{\forall k \in \gamma} x_{ij}^k \leq M y_{ij}, \quad \forall (i,j) \in \beta^1 \quad \text{déterminer les valeurs des variables } y_{ij} \quad (4.19)$$

$$\sum_{\forall (i,j) \in \delta} y_{ij} = 1, \quad \forall i \in \gamma \quad \text{empêcher la division des expéditions} \quad (4.20)$$

$$z_{ij} = \sum_{\forall k \in \gamma} r^k x_{ij}^k / R, \quad \forall (i,j) \in \beta^2 \quad \text{calcul du nombre de camions nécessaires} \quad (4.21)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in \beta^1 \quad (4.22)$$

$$z_{ij} \in \mathbb{R}^+, \quad \forall (i,j) \in \beta^2 \quad (4.23)$$

où β^1 ensemble des arcs ayant un coût > 0 (excluant les arcs $C-U$ et $C-P$)

β^2 ensemble des arcs $C-U$ et $C-P$

z_{ij} variable égale au nombre de camions qui doivent être utilisés pour livrer les commandes passant par l'arc (i,j)

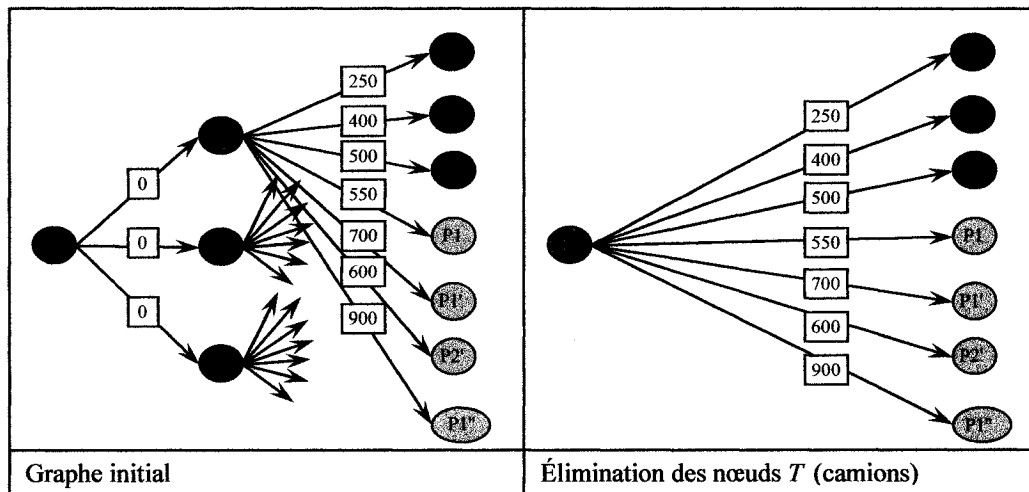


Figure 4.5 - Illustration du graphe avant et après l'élimination des noeuds T (vue partielle)

Par rapport au programme linéaire initial (4.5 à 4.16), les modifications apportées sont mineures. D'abord, pour simplifier le problème, les contraintes liées au respect du poids maximal des expéditions ont été relaxées (contraintes 4.11). De plus, étant donné que les noeuds T ont été supprimés, les contraintes de capacité liées à ces camions ont été éliminées. Puis, la fonction objectif (4.5) a été modifiée pour tenir compte du fait que plus d'un camion peut passer par un arc $C-U$ ou $C-P$. Enfin, pour calculer le nombre de camions nécessaires pour livrer les

commandes passant par un arc $C-U$ ou $C-P$, les contraintes 4.21 ont été ajoutées. Il est à noter que les contraintes 4.18 à 4.20 correspondent aux contraintes 4.10, 4.12 et 4.13 du modèle initial.

Bien que cette dernière étape du processus de réduction de la taille du graphe permette de réduire considérablement le nombre de variables et de contraintes du problème, elle introduit également une erreur expérimentale. En effet, les valeurs des variables z_{ij} , calculées à l'aide des contraintes 4.21, ne sont pas des nombres entiers. Par exemple, si $z_{C1-U3} = 3,4$, cela signifie que 3,4 camions sont nécessaires pour livrer les commandes qui seront expédiées du centre de transbordement $C1$ vers l'usine $U3$. Ainsi, la variable z_{C1-U3} introduira une erreur de $0,6 * L_{C1-U3}$ dans la fonction objectif, puisque quatre camions seront utilisés en réalité, et non 3,4. Pour tenter de réduire l'impact de cette erreur sur l'objectif, il est possible d'utiliser un coefficient θ pour ajuster le calcul de la distance à parcourir pour livrer les commandes des centres de transbordement aux usines:

$$\min \sum_{\forall (i,j) \in \beta^1} L_{ij} y_{ij} + \sum_{\forall (i,j) \in \beta^2} L_{ij} (z_{ij} + \theta) \quad (4.24)$$

Ce coefficient peut être estimé en fonction du nombre moyen de camions (\bar{z}) nécessaire pour livrer les commandes passant par les arcs $C-U$ et $C-P$. Par exemple, si $\bar{z} = 7,4$ camions, $\theta \cong 0,6$. Toutefois, étant donné que certains arcs $C-U$ et $C-P$ peuvent ne pas être utilisés, il est important d'estimer le coefficient θ à la baisse. Pour les simulations qui seront réalisées à la section 5, θ sera fixé à 0,2.

En somme, ces quatre étapes permettent de réduire de façon importante la taille du graphe. En appliquant ce processus à l'exemple détaillé dans le tableau 4.1, il est possible de réduire le nombre de variables de 275065 à environ 40000, ce qui représente une réduction de 85%. En fait, l'application de ce processus de réduction de la taille du graphe permettra de résoudre des problèmes impliquant un nombre plus élevé de commandes.

4.4. Programmation du SAD

Avant de présenter les expérimentations qui ont été réalisées, cette section expose brièvement les interfaces et la programmation du SAD.

Tout d'abord, le SAD a été développé à l'aide de Microsoft Access 2003. Bien que ce gestionnaire de base de données (BDD) ne soit pas un outil assez puissant et complet pour gérer une chaîne d'approvisionnement réelle, il est approprié pour effectuer les expérimentations de ce projet de recherche. En fait, il a permis de résoudre des problèmes de taille respectable afin de tester les hypothèses énoncées à la section 3.3.

Le SAD est géré entièrement à partir de la BDD. Cette BDD contient les informations de la chaîne d'approvisionnement à modéliser, du dernier graphe généré et des résultats obtenus pour tous les scénarios simulés (le diagramme relationnel de la BDD est disponible à l'annexe C). Il est à noter que la matrice contenant les distances entre les différentes entités de la chaîne d'approvisionnement (fournisseurs, centre de transbordement et usines) a été générée dans Microsoft Excel à l'aide de Microsoft MapPoint. Par la suite, les données ont été importées dans une table de la BDD.

Pour générer un scénario d'approvisionnement, il suffit de modifier directement les tables correspondantes dans la BDD ou d'utiliser un formulaire prévu à cet effet²². De plus, à l'aide du langage de programmation VBA (*Visual Basic for Applications*), plusieurs macros ont été créées pour évaluer les scénarios. Ces macros permettent d'effectuer les étapes suivantes:

1. calcul des inventaires en transit ;
2. calcul des inventaires en main ;
3. calcul des coûts d'inventaires totaux pour la semaine ;
4. détermination des commandes à livrer pour chaque jour de la semaine ;
5. pour chaque jour de la semaine:
 - 5.1. création du graphe ;
 - 5.2. résolution du problème de transport ;
6. calcul des coûts de transport totaux pour la semaine.

Pour résoudre les problèmes de transport (étape 5.2), des interfaces ont été créées entre la BDD et le logiciel d'optimisation utilisé. En fait, le programme linéaire développé pour optimiser les opérations de transport a été codé à l'aide du langage de programmation mathématique AMPL

²² Si les scénarios étaient générés en suivant une méthode de recherche locale, il serait possible de générer les scénarios en codant une procédure permettant de créer des solutions voisines à partir d'une solution de base.

(*A Mathematical Programming Language*)²³. Pour chaque problème de transport à résoudre, les informations du graphe sont importées, à l'aide d'un fichier *.run*, de la BDD au logiciel AMPL. Ces informations sont les inputs du modèle (fichier *.mod*). Une fois les données transférées, le problème est résolu à l'aide du solveur CPLEX (version 8.0). Enfin, les résultats obtenus sont transférés d'AMPL à la BDD par l'entremise du fichier *.run*.

L'évaluation d'un scénario permet donc de mémoriser les informations suivantes:

- les coûts, pour chaque couple (i,j) , liés aux inventaires en transit ;
- les coûts, pour chaque couple (i,j) , liés aux inventaires en main ;
- les tournées de véhicules à effectuer pour livrer les commandes à chaque jour de la semaine ;
- les coûts de transport encourus à chaque jour de la semaine ;
- les coûts logistiques totaux.

Ces diverses informations permettent d'analyser en profondeur les scénarios simulés, ce qui peut être utile lorsqu'un gestionnaire logistique cherche à départager deux scénarios similaires.

²³ FOURER, R., GAY, D., KERNIGHAN, B. 2003. *AMPL – A Modeling Language for Mathematical Programming*, Second Edition. Thomson. 515p.

CHAPITRE 5 : EXPÉRIMENTATIONS

Cette section présente les expérimentations qui ont été réalisées en fonction du plan d'expérience détaillé à la section 3.4, ainsi que les résultats obtenus. Ces résultats permettront, d'une part, de tester les hypothèses *H1* à *H4* et, d'autre part, de mieux comprendre le comportement des chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique. Avant de présenter ces résultats, il est important de décrire le problème qui a été résolu.

5.1. Description du problème résolu

Comme il a été mentionné, le terrain d'expérimentation de ce projet de recherche est la chaîne d'approvisionnement nord-américaine de Paccar. Évidemment, pour limiter la taille de la BDD à remplir pour effectuer les expérimentations, le problème qui a été résolu ne tient pas compte de toutes les pièces gérées par l'entreprise et ne modélise pas le réseau de transport complet. En effet, un échantillon représentatif de la chaîne d'approvisionnement de quatre usines d'assemblage a été modélisé. La figure 5.1 représente la disposition géographique des 42 fournisseurs, deux centres de transbordement et quatre usines qui ont été inclus dans l'échantillon modélisé.

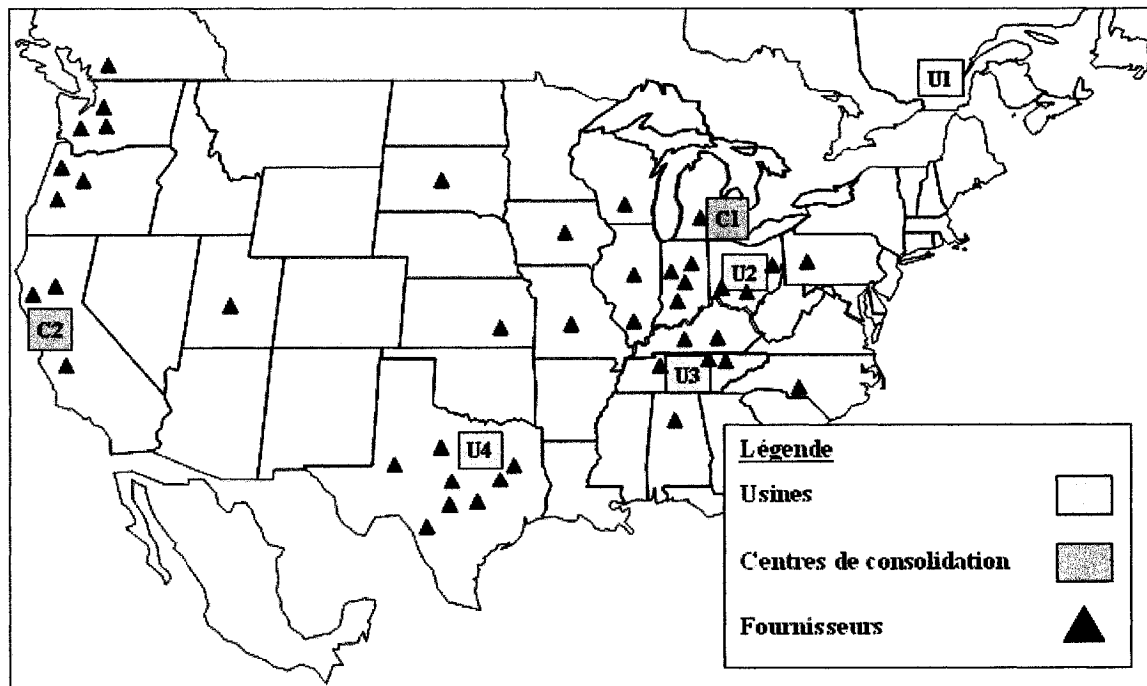


Figure 5.1 - Représentation géographique de la chaîne d'approvisionnement modélisée

Dans cette chaîne d'approvisionnement, l'usine *U1* est située en moyenne à 2560 km des 42 fournisseurs, alors que ce chiffre baisse à 1620 km, 1580 km et 1700 km pour les usines *U2*, *U3* et *U4*, respectivement. À l'aide des résultats qui seront obtenus suite à l'expérimentation *E4* (cf. tableau 3.1), il sera intéressant de comparer les coûts encourus par l'usine *U4* par rapport aux autres usines, afin d'analyser l'impact de la distance séparant les fournisseurs des usines.

Pour simuler une semaine d'approvisionnement, les requis de chaque usine auprès de chaque fournisseur ont dû être déterminés. Pour ce faire, 255 pièces au total ont été enregistrées dans la BDD. Ensuite, les quantités requises de chaque pièce pour chaque couple (i,j) ont été estimées en fonction des besoins hebdomadaires de l'usine *U1*²⁴. En fait, les quantités ont été ajustées pour que la valeur totale des pièces du fournisseur *i* requises par l'usine *j* au cours de l'horizon de planification atteigne un niveau prédéterminé. Par exemple, si l'usine *U1* achète en moyenne 50000\$ de marchandise du fournisseur *F5* à chaque semaine, la valeur totale des requis pour les couples $(F5, j)$ devait tourner autour de 50000\$. Puis, pour éviter que toutes les usines aient les mêmes requis auprès des mêmes fournisseurs, les quantités ont été modifiées de façon aléatoire et certains couples (i,j) ont été supprimés. Par contre, toutes les usines recevront environ la même valeur totale de marchandise au cours de la semaine, soit 1000000\$ ± 50000\$.

Pour déterminer le volume occupé par les expéditions, il a été nécessaire de lier, à chaque pièce, un type de contenant, ainsi qu'une quantité par contenant. Donc, en connaissant les quantités commandées et l'espace occupé par chacun des contenants, il a été possible de déterminer le volume occupé par chacune des expéditions. Il est à noter que la capacité des camions a été fixée à 70,75 m³ (2500 pi³) pour tous les scénarios.

Le tableau 5.1 résume les principales caractéristiques du problème qui a été résolu pour toutes les expérimentations réalisées, à l'exception de l'expérimentation *E4* dans laquelle la gestion des opérations logistiques est décentralisée. Par ailleurs, l'annexe D présente un tableau énumérant, pour chaque fréquence de livraison, l'ensemble des phases qui ont été utilisées.

²⁴ Les données proviennent de l'usine *U1*, qui est l'unique usine canadienne de Paccar (située à Ste-Thérèse au Québec). Étant donné que le volume de production des usines n'est pas un paramètre étudié dans ce projet de recherche, il a été supposé que chaque usine assemble environ la même quantité de camions par jour.

Tableau 5.1 - Principales caractéristiques du problème résolu

Caractéristique du problème	Valeur
Horizon de planification	7 jours
Nombre de fournisseurs	42
Nombre de centres de transbordement	2
Nombre d'usines	4
Distance moyenne séparant les fournisseurs des usines	1865 km
Durée de transit	entre 1 et 7 jours
Nombre de pièces	255
Valeur totale de la marchandise à livrer au cours de l'horizon de planification	4000000 \$
Nombre total de commandes à livrer au cours de la semaine	entre 251 et 504

5.2. Résolution des problèmes de transport

Étant donné la complexité du réseau de transport modélisé, il est important de traiter des problèmes de transport qui ont été résolus. Pour effectuer les quatre expérimentations du plan d'expérience présenté à la section 3.4, 26 scénarios d'approvisionnement ont été simulés. Pour chacun de ses scénarios, cinq problèmes de transport ont été résolus.

Le tableau 5.2 énumère, pour chaque scénario, le nombre de commandes qui devaient être livrées. Comme il est indiqué dans ce tableau, le nombre de commandes à livrer à chaque jour de la semaine varie entre 0 et 230. En fait, le nombre total de commandes à livrer varie en fonction de la fréquence moyenne de livraison (f_{moy}), alors que la répartition des commandes au cours de la semaine dépend des phases de livraison. Étant donné le décalage causé par les week-ends, il y a plus de livraisons à expédier les vendredis.

Bien que le processus de réduction de la taille du graphe détaillé à la section 4.3.5 ait été appliqué à tous les problèmes de transport, certains d'entre eux n'ont pu être résolus à l'optimalité (se référer aux données en gras dans le tableau 5.2). En fait, la taille des problèmes dans lesquels il y a de nombreuses possibilités de consolidation entre les fournisseurs d'une même région augmente rapidement en fonction du nombre de commandes prises en compte. De tels problèmes engendrent des graphes dans lesquels il y a beaucoup d'arcs $O-O$, ce qui se traduit par un nombre élevé de variables. Bref, les problèmes qui contenaient plus de 50000 variables n'ont pu être résolus à l'optimalité, et ce, après quelques heures de résolution. Toutefois, en analysant les résultats obtenus, il est possible de déduire que les solutions sont

suffisamment près de l'optimalité pour effectuer une analyse approfondie du système d'approvisionnement modélisé.

Tableau 5.2 - Nombre de commandes à livrer pour chacun des scénarios simulés

Scénario		Nombre de commandes à livrer					
		lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	total
<i>E1</i>	1	35	48	37	16	115	251
	2	44	47	39	18	145	293
	3	60	48	50	20	161	339
	4	64	57	59	22	176	378
	5	69	62	63	32	194	420
	6	80	68	69	35	210	462
	7	84	71	78	41	230	504
<i>E2</i>	8	68	60	59	35	156	378
	9	81	62	62	39	134	378
	10	104	51	57	38	128	378
	11	102	36	65	34	141	378
	12	104	30	48	17	179	378
	13	107	22	49	13	187	378
<i>E3</i>	14	73	66	66	58	115	378
	15	73	66	66	58	115	378
	16	64	57	59	22	176	378
	17	73	66	66	58	115	378
	18	50	60	36	26	206	378
	19	50	60	36	26	206	378
	20	64	57	59	22	176	378
	21	64	57	59	22	176	378
	22	50	60	36	26	206	378
<i>E4</i>	23	15	14	8	11	43	91
	24	17	14	17	8	38	94
	25	16	13	19	3	46	97
	26	16	16	15	0	49	96

Il est à noter que, lorsque le nombre de commandes à livrer en une journée dépasse la centaine, il n'est pas possible d'obtenir une solution entière, même après une dizaine d'heures de résolution. Pour ces cas particuliers, le problème de transport a été divisé en trois sous problèmes. En effet, la disposition géographique des fournisseurs fait en sorte qu'il est possible de séparer le problème en trois régions: l'Ouest des États-Unis et du Canada, le Texas, ainsi que l'Est des États-Unis. Bref, les problèmes de transport contenant plus de 100 commandes à livrer ont donc

été résolus pour ses trois régions séparément, ce qui augmente légèrement l'erreur expérimentale²⁵.

5.3. Présentation et analyse des résultats

Les sections 5.3.1 à 5.3.4 présentent l'analyse des résultats pour les expérimentations *E1* à *E4*. Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau 5.3. Ce tableau détaille, pour chacun des 26 scénarios simulés, les valeurs des variables de décision et des paramètres à l'étude, ainsi que les différents coûts logistiques.

5.3.1. Expérimentation *E1*

L'expérimentation *E1* consistait à faire varier la fréquence moyenne de livraison (f_{moy}) pour déterminer les impacts au niveau des coûts logistiques. En fait, sept scénarios ont été simulés, ce qui a permis de faire varier f_{moy} de 1,5 à 3 livraisons par semaine.

Tout d'abord, cette expérimentation visait à tester l'hypothèse *H2*, selon laquelle l'augmentation des fréquences de livraison permet de réduire considérablement les coûts d'inventaires, et ce, dans le contexte d'une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique. Du scénario 1 au scénario 7, les coûts d'inventaires sont passés de 6464\$ à 5018\$, ce qui représente une réduction de 22%, alors que la fréquence moyenne de livraison a doublé (cf. tableau 5.3). Il est donc possible de constater que la réduction des coûts d'inventaires n'est pas directement proportionnelle à l'augmentation des fréquences de livraison, comme le montre la figure 5.2.

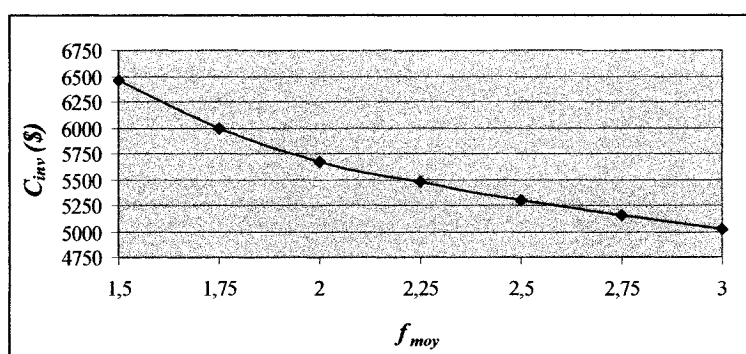


Figure 5.2 - Coûts d'inventaires en fonction de la fréquence moyenne de livraison

²⁵ En ce qui concerne les problèmes trop volumineux, c'est-à-dire qui ne peuvent être résolus en un temps raisonnable, il aurait aussi été possible de relaxer les contraintes d'intégrité pour obtenir une solution. Par contre, cette option a été rejetée puisqu'elle aurait augmenté considérablement l'erreur expérimentale.

Tableau 5.3 - Résultats obtenus pour les expérimentations *E1* à *E4*

Scénario	f_{moy} (# livraisons /semaine)	ρ_{ij}	h	c	l_{moy} (km)	Usines prises en compte	C_{inv} (\\$)	Distance parcourue					C_{transp} (\\$)	C_{TOT} (\\$)
								lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi		
<i>E1</i>	1	1,5	base	10	1	1900	6464	30083	32533	22292	14553	60325	159786	166250
	2	1,75	base	10	1	1900	5988	31919	28436	21545	14790	67898	164608	170596
	3	2	base	10	1	1900	5674	31910	29194	23813	14692	72320	171929	177603
	4	2,25	base	10	1	1900	5472	31216	30941	24856	14757	74547	176317	181789
	5	2,5	base	10	1	1900	5296	35283	29813	26762	20422	77532	189812	195108
<i>E2</i>	6	2,75	base	10	1	1900	5160	40621	29864	28548	21218	80034	200285	205445
	7	3	base	10	1	1900	5018	40732	31351	31562	23460	83923	211028	216046
	8	2,25	1	10	1	1900	5472	30085	30430	32264	28066	68231	189076	194548
	9	2,25	1 +	10	1	1900	5476	34297	31884	34383	29711	62362	192637	198113
	10	2,25	1 ++	10	1	1900	5401	41365	25187	33647	29810	62142	192151	197552
<i>E3</i>	11	2,25	2	10	1	1900	5400	40626	22262	34634	29508	64043	191073	196473
	12	2,25	2 +	10	1	1900	5469	40935	16027	24063	13748	71411	166184	171653
	13	2,25	2 ++	10	1	1900	5419	41073	14340	24063	12332	73522	165330	170749
	14	2,25	base	20	1,2	1200	8004	21587	27412	20972	15093	36842	146287	154291
	15	2,25	base	30	1	1200	12007	21587	27412	20972	15093	36842	121906	133913
<i>E4</i>	16	2,25	base	10	1,2	1900	5472	31216	30941	24856	14757	74547	211580	217052
	17	2,25	base	10	0,8	1200	4002	21587	27412	20972	15093	36842	97525	101527
	18	2,25	base	30	1,2	2600	21010	32915	38357	37924	28340	128054	318708	339718
	19	2,25	base	10	1	2600	7000	32915	38357	37924	28340	128054	265590	272590
	20	2,25	base	30	0,8	1900	16415	31216	30941	24856	14757	74547	141054	157469
<i>E4</i>	21	2,25	base	20	1	1900	10943	31216	30941	24856	14757	74547	176317	187260
	22	2,25	base	20	0,8	2600	13976	32915	38357	37924	28340	128054	212472	226448
	23	2,17	base	10	1	1900	1651	14880	13129	8392	11574	31118	79093	80744
	24	2,24	base	10	1	1900	1204	10665	8572	8035	2713	15063	45048	46252
	25	2,31	base	10	1	1900	1263	8466	8236	10090	953	19684	47429	48692
	26	2,29	base	10	1	1900	1354	9991	11021	6799	0	23316	51127	52481

* Dans ce tableau, les coûts sont en dollars américains (\$U.S.).

La figure 5.2 montre que plus la fréquence moyenne de livraison augmente, moins les coûts d'inventaires diminuent. Ce phénomène peut s'expliquer, entre autres, par le fait que les week-ends limitent la réduction des inventaires (cf. section 4.2). En fait, plus les fréquences de livraison augmentent, plus la contrainte des week-ends prend de l'importance. Ainsi, la marge de manœuvre pour réduire les inventaires diminue. De plus, étant donné que la réduction des inventaires possible grâce à l'augmentation des fréquences de livraison est uniquement liée aux inventaires en main²⁶, le seuil minimum pour les coûts d'inventaires est borné par les inventaires en transit. Par conséquent, en augmentant davantage la fréquence moyenne de livraison, la courbe de la figure 5.2 atteindrait éventuellement un plateau.

En somme, dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, la réduction des coûts d'inventaires par l'augmentation des fréquences de livraison est limitée par les importants délais de livraison.

L'expérimentation *E1* visait également à étudier l'hypothèse *H3*, qui stipule qu'il est possible d'augmenter les fréquences de livraison sans accroître de façon considérable les coûts logistiques totaux. Du scénario 1 au scénario 7, les coûts sont passés de 166250\$ à 216046\$, ce qui représente une augmentation de 30%. Pour le scénario 7, les coûts d'inventaires s'élèvent à 5018\$, ce qui équivaut à 2,3% des coûts logistiques totaux. La réduction des coûts d'inventaires est donc loin de compenser pour l'augmentation des coûts de transport.

Pour étudier plus en détail la variation des coûts logistiques, la figure 5.3 présente un graphique de C_{TOT} en fonction de f_{moy} . En passant d'une fréquence moyenne de 1,5 à 2,25 livraisons/semaine, les coûts logistiques totaux ont augmenté de 9% seulement. Par contre, de 2,25 à 3 livraisons/semaine, cette augmentation est passée à 19%. En effet, la courbe de la figure 5.3 montre qu'à partir de $f_{moy} = 2,25$ livraisons/semaine, les coûts logistiques commencent à augmenter plus rapidement. Évidemment, cette augmentation se situe au niveau des coûts de transport. Donc, à partir de cette fréquence, il semble que les opérations de consolidation ne permettent plus de contenir l'augmentation des coûts de transport.

²⁶ Les coûts encourus pour supporter les inventaires en transit ne dépendent pas de la fréquence de livraison. En effet, ils dépendent uniquement de la durée de transit (cf. section 4.2).

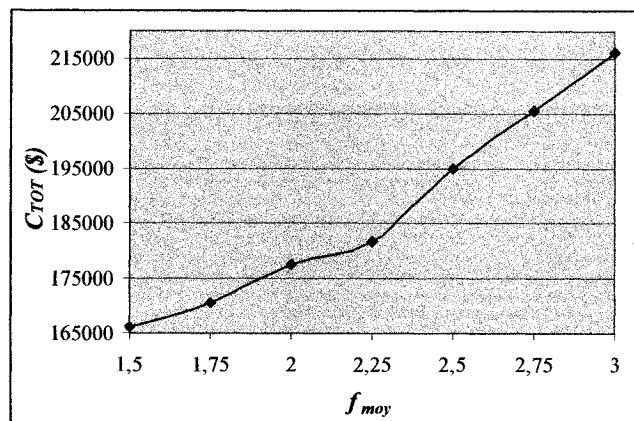


Figure 5.3 - Coûts logistiques totaux en fonction de la fréquence moyenne de livraison

Ce comportement n'est pas évident à expliquer. En fait, l'augmentation des fréquences de livraison permet de bénéficier davantage des opérations de consolidation, car plus les fréquences augmentent, moins les commandes sont volumineuses et plus il y a de commandes à consolider. Par contre, la disposition géographique des fournisseurs ne permet pas toujours d'effectuer des opérations de consolidation. De plus, les différentes phases de livraison et durées de transit font en sorte que les commandes peuvent être expédiées du lundi au vendredi, réduisant ainsi les possibilités de consolidation. Par conséquent, l'interaction de ses différents facteurs fait en sorte qu'il est très complexe de prédire l'augmentation des coûts de transport en fonction des fréquences de livraison. Toutefois, en tenant compte de ces différents facteurs, il est possible d'augmenter « intelligemment » les fréquences de livraison (cf. section 6.2).

Bref, comme le propose l'hypothèse *H3*, l'expérimentation *E1* a permis d'augmenter les fréquences de livraison sans accroître de façon considérable les coûts logistiques totaux. En effet, les résultats obtenus montrent qu'une entreprise peut déterminer une plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'augmentation des coûts logistiques totaux est acceptable, et ce, en fonction du niveau de service que l'entreprise désire pourvoir à ses usines.

5.3.2. Expérimentation *E2*

La seconde expérimentation consistait à optimiser les phases de livraison en maintenant la fréquence moyenne (f_{moy}) constante. Cette expérimentation visait à étudier l'hypothèse *H4*, selon laquelle l'optimisation des phases de livraison permet de réduire significativement les coûts logistiques totaux.

L'expérimentation *E1* a permis de constater que $f_{moy} = 2,25$ livraisons/semaine est la fréquence moyenne à partir de laquelle les coûts logistiques totaux commencent à augmenter plus rapidement. C'est pourquoi les six scénarios de l'expérimentation *E2* (scénarios 8 à 13) ont une fréquence moyenne de 2,25 livraisons/semaine. En fait, le scénario 8 a été généré à partir du scénario 4, alors que les scénarios 9 à 13 découlent du scénario 8.

Selon le plan d'expérience, deux stratégies devaient être mises en application dans le but d'optimiser les phases de livraison. La première stratégie (stratégie 1) consistait à déterminer les phases de livraison de façon à réduire la durée d'entreposage des pièces, et ce, pour minimiser les inventaires en main.

Pour une fréquence de livraison et une durée de transit données, il est possible de déterminer, analytiquement, la phase qui minimise l'inventaire moyen en main (cf. tableau 5.4). Pour ce faire, il s'agit de calculer l'inventaire moyen en main pour toutes les phases possibles et de retenir la phase qui minimise cet inventaire moyen. Par exemple, si la fréquence est de deux livraisons par semaine et que la durée de transit est de trois jours, la phase {lundi ; jeudi} implique que le fournisseur doit expédier une commande contenant 2,5 jours de stock le vendredi matin (qui sera reçue à l'usine le lundi matin), et une seconde commande contenant 2,5 jours de stock le lundi matin (qui sera reçue à l'usine le jeudi matin). Puis, en déterminant l'inventaire en main à chaque matin, il est possible de calculer l'inventaire moyen au cours de la semaine.

Comme le montre le tableau 5.4, pour une durée de transit donnée, l'augmentation de la fréquence de livraison permet toujours de réduire l'inventaire moyen. Par contre, comme il a été observé à l'expérimentation *E1*, plus la fréquence de livraison augmente, moins les inventaires diminuent. Par exemple, pour une durée de transit de deux jours, l'inventaire moyen en main passe de 2,71 jours (1 livraison/semaine) à 1,79 jours, 1,52 jours, 1,46 jours et 1,14 jours (5 livraisons/semaine).

Les phases des scénarios 8, 9 et 10 ont été déterminées en utilisant les données du tableau 5.4. D'abord, pour le scénario 8, les phases ont été optimisées pour le tiers des couples (i,j) , tandis que pour les scénarios 9 et 10, les deux tiers et la totalité des couples (i,j) ont été traités, respectivement.

Tableau 5.4 - Phase optimale en fonction de la fréquence de livraison et de la durée de transit

Fréquence de livraison (# liv. / semaine)	Durée de transit (jours)	Phase optimale	Inventaire moyen en main* (jours)
1	1	mardi	2,43
1	2	mercredi	2,71
1	3	lundi	2,14
1	4	lundi	2,14
1	5	lundi	2,14
1	6	lundi	2,14
1	7	lundi	2,14
2	1	mardi et jeudi	1,72
2	2	lundi et mercredi	1,79
2	3	lundi et jeudi	1,57
2	4	lundi et mardi (ou mercredi ou jeudi)	1,79
2	5	lundi et mercredi	1,43
2	6	lundi et mercredi	1,43
2	7	lundi et mercredi	1,43
3	1	mardi, mercredi et vendredi	1,47
3	2	lundi (ou mardi), mercredi et jeudi	1,52
3	3	lundi, mardi (ou mercredi) et jeudi	1,43
3	4	lundi, mardi (ou mercredi) et vendredi	1,62
3	5	lundi, mardi et mercredi (ou jeudi ou vendredi)	1,43
3	6	lundi, mardi et jeudi	1,19
3	7	lundi, mardi et jeudi	1,19
4	1	mardi, mercredi, jeudi et vendredi	1,35
4	2	lundi (ou mardi), mercredi, jeudi et vendredi	1,46
4	3	jeudi, vendredi et deux jours parmi lundi, mardi et mercredi	1,39
4	4	lundi, vendredi et deux jours parmi mardi, mercredi et jeudi	1,32
4	5	lundi, mardi et deux jours parmi mercredi, jeudi et vendredi	1,25
4	6	lundi, mardi, mercredi et jeudi	1,07
4	7	lundi, mardi, mercredi et jeudi	1,07
5	1 à 7	lundi, mardi, mercredi, jeudi et vendredi	0,71 à 1,14

* Inventaire quotidien calculé en début de journée.

Par rapport au scénario 4, les résultats du scénario 10 (cf. tableau 5.3) montrent une réduction de 1,3% des coûts d'inventaires (réduction de 71\$), alors que les coûts logistiques totaux ont augmenté de 8,7% (augmentation de 15730\$). Étant donné que la stratégie 1 vise spécifiquement la réduction des inventaires en main, ces résultats étaient prévisibles. En effet, les coûts d'inventaires représentent moins de 5% des coûts logistiques totaux. Donc, en répartissant les

livraisons au cours de la semaine sans tenir compte des opérations de transport, les coûts logistiques totaux ont considérablement augmenté.

D'un autre côté, la seconde stratégie d'optimisation des phases de livraison (stratégie 2) a été établie spécifiquement pour réduire les coûts de transport. À partir du scénario 10, les scénarios 11 à 13 ont été générés en modifiant les phases de façon à ce que les fournisseurs agglomérés dans une région expédient leurs commandes la (ou les) même(s) journée(s), dans le but de favoriser les opérations de consolidation. Pour le scénario 11, les fournisseurs situés au Texas ont été considérés. Ensuite, les fournisseurs situés dans l'Ouest (scénario 12) et dans l'Est des États-Unis (scénarios 13) ont été traités.

Les résultats obtenus pour cette seconde stratégie d'optimisation sont très concluants. Du scénario 10 au scénario 13, les coûts d'inventaires sont demeurés pratiquement les mêmes (augmentation de 0,3% seulement), alors que les coûts de transport ont été réduits de 26821\$, ce qui représente une diminution de 14%. En particulier, du scénario 11 au scénario 12, les coûts de transport ont été réduits de 24889\$. Cette réduction s'explique, en majeure partie, par le fait que le scénario 12 concerne les fournisseurs situés dans l'Ouest, qui sont très éloignés des usines. En effet, les opérations de consolidation sont d'autant plus avantageuses lorsque de longues distances doivent être parcourues.

Pour expliquer davantage la réduction des coûts logistiques totaux par l'optimisation des phases de livraison, il s'avère intéressant d'analyser les distances parcourues au cours de la semaine. Le tableau 5.5 détaille, pour chaque jour de la semaine, la distance moyenne parcourue, par commande, pour les scénarios 4 et 13. Bien que ces scénarios comprennent tous deux un total de 378 commandes à livrer durant la semaine, la distance moyenne parcourue par commande est passée de 466 km pour le scénario 4 à 437 km pour le scénario 13. En fait, l'application de la seconde stratégie d'optimisation des phases de livraison a modifié la répartition des commandes au cours de la semaine. Dans le scénario 4, 63,5% des commandes sont expédiées le lundi et le vendredi, alors que ce chiffre augmente à 77,8% pour le scénario 13 (cf. tableau 5.2). Le tableau 5.5 montre une réduction importante de la distance moyenne parcourue par commande pour ces deux journées. Ainsi, les résultats mettent en évidence le fait que plus il y a de commandes à livrer au cours d'une journée, moins la distance moyenne à parcourir par commande est élevée, et ce, à cause des opérations de consolidation.

Tableau 5.5 - Distance moyenne parcourue par commande pour les scénarios 4 et 13

Scénario	Distance moyenne parcourue par commande (km)					
	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	moyenne
4	488	543	421	671	424	466
13	384	652	491	949	393	437

En somme, l'optimisation des phases de livraison a permis de réduire les coûts logistiques totaux de 6% par rapport au scénario 4, ce qui représente une réduction significative par rapport au scénario d'approvisionnement initial.

5.3.3. Expérimentation E3

Après avoir étudié l'impact des fréquences et des phases de livraison sur les coûts logistiques, l'expérimentation E3 visait à étudier l'impact des paramètres h , c et l_{moy} sur le comportement du système d'approvisionnement. Pour ce faire, un design d'expérience comprenant neuf scénarios a été généré (scénarios 14 à 22). Il est à noter que pour générer les scénarios dans lesquels $l_{moy} \neq 1900$ km, il a été nécessaire de multiplier toutes les distances du réseau de transport du scénario 4 par 12/19 pour les scénarios 14, 15 et 17, et par 26/19 pour les scénarios 18, 19 et 22. Ainsi, la forme du réseau de transport est demeurée la même. Un exercice similaire a été effectué pour les durées de transit.

Pour analyser les résultats obtenus, il faut d'abord vérifier si les paramètres étudiés ont une influence significative sur les variables de réponse, soit les coûts d'inventaires (C_{inv}), les coûts de transport (C_{transp}) et les coûts logistiques totaux (C_{TOT}). Pour ce faire, il est possible de générer, à l'aide du logiciel *Statistica*, le coefficient de corrélation (R^2) correspondant à chaque variable de réponse. Les coefficients obtenus pour les variables C_{inv} , C_{transp} et C_{TOT} sont, respectivement, 0,981, 0,990 et 0,988. Étant donné que ces coefficients sont très près de 1, les paramètres étudiés ont une forte influence sur les trois variables de réponse.

Pour quantifier l'impact des paramètres h , c et l_{moy} , il s'agit de déterminer les équations de régression correspondantes. En fait, les valeurs de C_{inv} , C_{transp} et C_{TOT} peuvent être estimées à l'aide d'une fonction $f(X_h, X_c, X_{l_{moy}})$:

$$C_{inv} = \beta_{0C_{inv}} + \beta_{hC_{inv}} X_h + \beta_{cC_{inv}} X_c + \beta_{l_{moy}C_{inv}} X_{l_{moy}} + \varepsilon_{C_{inv}} \quad (5.1)$$

$$C_{transp} = \beta_{0C_{transp}} + \beta_{hC_{transp}} X_h + \beta_{cC_{transp}} X_c + \beta_{l_{moy}C_{transp}} X_{l_{moy}} + \varepsilon_{C_{transp}} \quad (5.2)$$

$$C_{TOT} = \beta_{0C_{TOT}} + \beta_{hC_{TOT}} X_h + \beta_{cC_{TOT}} X_c + \beta_{l_{moy}C_{TOT}} X_{l_{moy}} + \varepsilon_{C_{TOT}} \quad (5.3)$$

où X_h variable indépendante représentant h
 X_c variable indépendante représentant c
 $X_{l_{moy}}$ variable indépendante représentant l_{moy}
 β_{ij} coefficient de régression de la variable i pour la variable de réponse j
 ε_j effets inconnus et non observables pour la variable de réponse j

Les valeurs des variables de réponse sont donc estimées par un polynôme de degré 1. Il est à noter que les effets d'interaction des variables indépendantes sont considérés comme étant négligeables²⁷. C'est pourquoi ils n'ont pas été ajoutés dans les équations 5.1 à 5.3.

Les tableaux 5.6 à 5.8 présentent les coefficients de régression des variables C_{inv} , C_{transp} et C_{TOT} . Dans ces trois tableaux, les coefficients qui sont en gras représentent les variables qui ont une influence significative sur la variable de réponse. Naturellement, le paramètre c n'a pas une influence significative sur les coûts d'inventaires (cf. tableau 5.6) et le paramètre h n'influence pas les coûts de transport (cf. tableau 5.7), puisque ces deux types de coûts sont calculés avec deux modules indépendants.

Tableau 5.6 - Tableau de régression de C_{inv}

Facteur	Coefficient de régression	Intervalle de confiance (95%)
β_0	10981,0	[8821,0 ; 13141,0]
β_h	10986,0	[5695,1 ; 16276,9]
β_c	31,0	[-5259,9 ; 5321,9]
$\beta_{l_{moy}}$	5991,0	[700,1 ; 11281,9]

Tableau 5.7 - Tableau de régression de C_{transp}

Facteur	Coefficient de régression	Intervalle de confiance (95%)
β_0	187937,7	[167128,9 ; 208746,5]
β_h	2324,3	[-48646,6 ; 53295,3]
β_c	75174,7	[24203,7 ; 126145,6]
$\beta_{l_{moy}}$	143684,0	[92713,1 ; 194654,9]

²⁷ Un design d'expérience permet de quantifier les effets d'interaction des variables indépendantes sur la variable de réponse. Par exemple, supposons un design d'expérience visant à quantifier les effets des variables X_A , X_B et X_C sur la réponse Y . L'effet d'interaction des variables X_A et X_B est non négligeable lorsque l'impact de X_A sur la réponse Y dépend de la valeur de X_B , et vice-versa.

Tableau 5.8 - Tableau de régression de C_{TOT}

Facteur	Coefficient de régression	Intervalle de confiance (95%)
β_0	198918,7	[175970,7 ; 221866,6]
β_h	13310,3	[-42900,4 ; 69521,0]
β_c	75205,7	[18995,0 ; 131416,4]
β_{lmoy}	149675,0	[93464,3 ; 205885,7]

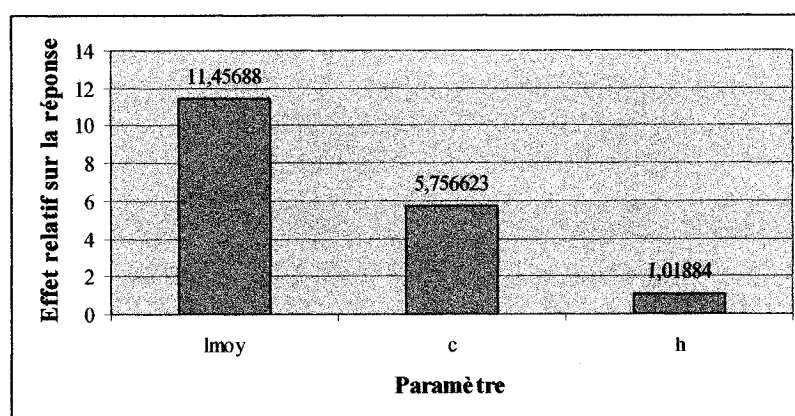
En fonction des coefficients obtenus, les équations de régression pour les variables C_{inv} , C_{transp} et C_{TOT} sont les suivantes:

$$C_{inv} \cong 10981,0 + 10986,0 X_h + 31,0 X_c + 5991,0 X_{lmoy} \quad (5.4)$$

$$C_{transp} \cong 187937,7 + 2324,3 X_h + 75174,7 X_c + 143684,0 X_{lmoy} \quad (5.5)$$

$$C_{TOT} \cong 198918,7 + 13310,3 X_h + 75205,7 X_c + 149675,0 X_{lmoy} \quad (5.6)$$

En observant ces équations, il est possible de constater que la distance moyenne séparant les fournisseurs des usines (l_{moy}) a un impact très important sur chacune des variables de réponse. D'ailleurs, au niveau des coûts logistiques totaux, c'est l_{moy} qui influence le plus cette variable de réponse, comme le montre la figure 5.4. Cette figure est intéressante puisqu'elle présente l'effet relatif de chaque paramètre sur C_{TOT} (les effets relatifs ont été générés à l'aide de Statistica). Alors que l_{moy} et c ont un impact important sur les coûts logistiques totaux, h n'influence pas C_{TOT} de façon significative.

Figure 5.4 - Effet relatif des paramètres étudiés sur C_{TOT}

En somme, les paramètres l_{moy} et c sont importants à considérer en ce qui concerne l'optimisation des opérations logistiques. Par exemple, une augmentation du prix du pétrole, qui engendre

habituellement une augmentation des taux de transport, peut inciter une entreprise à encourager davantage les opérations de consolidation dans son réseau d'approvisionnement, même si cette stratégie risque d'augmenter les durées de transit. De plus, l'impact majeur de l_{moy} sur les coûts logistiques peut amener une entreprise à développer différentes stratégies d'approvisionnement pour ses usines. Par exemple, en comparaison à une usine éloignée de ses fournisseurs, une usine située en moyenne très près de ses fournisseurs aurait avantage à augmenter ses fréquences de livraisons, puisque l'impact sur les coûts de transport est limité.

D'un autre côté, le paramètre h n'a pas la même incidence sur les coûts logistiques. En effet, étant donné que les coûts d'inventaires ne représentent que quelques pourcents des coûts logistiques totaux, la variation du pourcentage de la valeur des pièces qui est imputé comme coût d'inventaires (h) n'influence pas C_{TOT} de façon significative. Néanmoins, comme il sera discuté à la section 6, ce paramètre ne doit pas être négligé.

5.3.4. Expérimentation *E4*

La dernière expérimentation consistait à étudier l'hypothèse *H1*, qui stipule que, dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, une gestion centralisée de l'approvisionnement permet de réduire les coûts logistiques totaux de façon considérable, en comparaison à une gestion décentralisée. Pour ce faire, le scénario 4 a été divisé en quatre scénarios indépendants (scénarios 23 à 26), comprenant les commandes d'une seule usine.

Les résultats obtenus sont significatifs. En effet, la somme des coûts logistiques des scénarios 23 à 26 s'élève à 228169\$, ce qui représente une augmentation de 25,5% par rapport au scénario 4. En fait, la distance moyenne parcourue par commande est passée de 466 km au scénario 4 à 592 km en moyenne pour les scénarios 23 à 26 (cf. tableau 5.9).

Par ailleurs, l'expérimentation *E4* visait également à étudier l'impact de l'éloignement d'une usine par rapport à ses fournisseurs. Alors que les usines *U2* à *U4* sont situées à environ 1650 km en moyenne de leurs fournisseurs, ce chiffre s'élève à 2560 km pour l'usine *U1*, ce qui représente une augmentation de plus de 55% (cf. figure 5.1). En fait, l'éloignement de l'usine *U1* par rapport à ses fournisseurs s'est fait sentir au niveau des résultats, puisque cette usine a encourus des coûts logistiques 65% plus élevés que les autres usines.

Tableau 5.9 - Distance moyenne parcourue par commande pour les scénarios 4 et 23 à 26

Scénario(s)	Distance moyenne parcourue par commande (km)					
	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	moyenne
4	488	543	421	671	424	466
23 (U1)	992	938	1049	1052	724	869
24 (U2)	627	612	473	339	396	479
25 (U3)	529	634	531	318	428	489
26 (U4)	624	689	453	n/a	476	533
23 à 26	693	718	626	570	506	592

Bref, cette dernière expérimentation a permis d'observer que la centralisation des opérations d'approvisionnement permet de réduire considérablement les coûts logistiques totaux (une telle réduction se chiffre en millions de dollars pour les entreprises de moyenne envergure), en plus de mettre en évidence l'impact de l'éloignement d'une usine par rapport à ses fournisseurs. Par contre, seule l'optimisation des opérations de transport a été prise en compte. L'impact de la centralisation des opérations d'approvisionnement sur les niveaux d'inventaires dans la chaîne logistique n'a donc pas été quantifié.

CHAPITRE 6 : DISCUSSION

L'analyse des résultats présentée à la section précédente a permis d'analyser le comportement du système logistique en fonction de la variation des variables de décision et des paramètres à l'étude. Il est maintenant possible d'évaluer le SAD développé et de faire le bilan des observations effectuées.

6.1. Évaluation du SAD et possibilités d'amélioration

Le SAD présenté à la section 4 s'est avéré un outil très efficace pour tester les hypothèses émises dans le cadre de ce projet de recherche. En effet, l'échantillon de la chaîne d'approvisionnement nord-américaine de Paccar modélisé à l'aide d'une base de données Microsoft Access et du langage de programmation mathématique AMPL a permis de mieux comprendre l'influence des fréquences et des phases de livraison sur les coûts de transport et d'inventaires. Grâce à la structure du SAD (cf. figure 4.1), il a été possible d'évaluer l'impact de ces variables sur chacun des deux types de coûts étudiés. De plus, la résolution d'un problème de transport pour chaque jour de la semaine a permis d'effectuer une analyse approfondie des opérations de transport.

Les principales lacunes du SAD ont été observées lors de la résolution des problèmes de transport. En effet, le moteur d'optimisation développé ne permet pas de résoudre des problèmes comportant plus d'une centaine de commandes, et ce, puisque le nombre de variables devient trop élevé. Pour augmenter la taille des problèmes qui peuvent être résolus, il aurait été possible de réduire davantage le nombre de variables ou d'utiliser une version plus puissante de CPLEX. Par contre, étant donné que certains problèmes peuvent comporter des milliers de commandes, il est indéniable que ce moteur d'optimisation n'est pas approprié pour la majorité des problèmes rencontrés en pratique. Par ailleurs, la difficulté à résoudre des problèmes de grande taille met en évidence une autre lacune du SAD, soit le temps nécessaire à la génération et à l'évaluation des scénarios.

Bref, il est possible de constater que le SAD développé dans ce mémoire n'est pas approprié pour optimiser une chaîne logistique de façon quotidienne. En fait, la structure de ce SAD peut certes être utilisée pour des problèmes de taille réelle. Par contre, comme le montre la figure 6.1, des outils technologiques plus puissants doivent y être greffés.

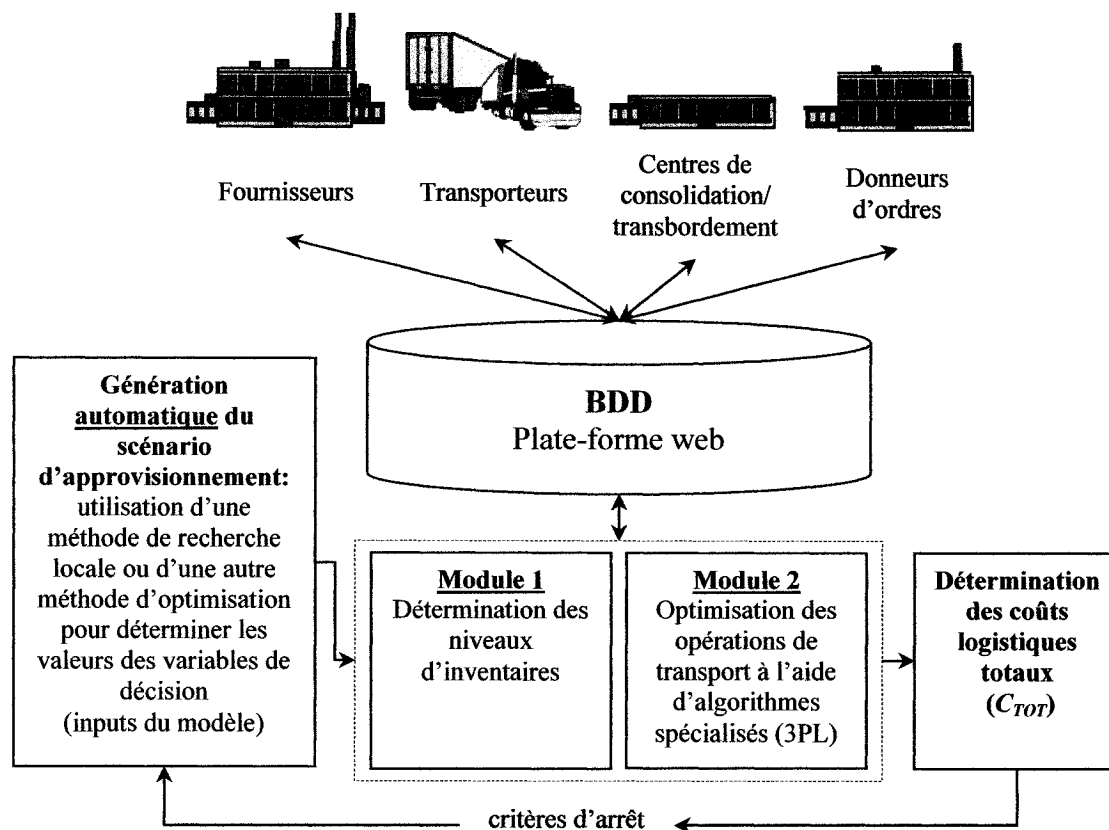


Figure 6.1 - SAD conçu pour guider les décisions tactiques et opérationnelles en ce qui concerne les opérations logistiques dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique

Le SAD schématisé par la figure 6.1 comporte trois différences majeures par rapport au SAD développé dans ce mémoire. D'abord, la BDD comporte une plate-forme web permettant un échange d'information, en temps réel, entre les partenaires commerciaux formant la chaîne d'approvisionnement (fournisseurs, transporteurs, centres de consolidation et/ou de transbordement et usines). Cette plate-forme web donne accès aux données liées aux commandes et aux opérations de transport. De plus, ce SAD utilise une méthode d'optimisation (méthode de recherche locale ou autre) pour générer les scénarios automatiquement. Pour que cette méthode d'optimisation soit efficace, il est possible de générer de bonnes solutions de base en fonction des observations réalisées à la section 5.3. Enfin, le module d'optimisation des opérations de transport est géré par une tierce partie logistique possédant de puissants algorithmes mathématiques. Bref, ce SAD permettrait de générer et de tester rapidement des problèmes de taille réelle afin de minimiser les coûts logistiques du système. De plus, concernant le niveau

tactique de planification, ce SAD s'avérerait un outil idéal pour évaluer différentes stratégies de transport et de gestion des inventaires.

Pour être en mesure d'utiliser efficacement un tel outil d'aide à la décision, il faut être capable de générer de bonnes solutions de départ et de prédire le comportement du système en fonction de la variation des variables décisionnelles. La section 6.2 présente un bilan des observations réalisées suites aux expérimentations, ainsi que des recommandations quant au pilotage d'un système centralisé de gestion des opérations d'approvisionnement.

6.2. Bilan des observations et recommandations

Les expérimentations réalisées à la section 5 ont permis d'effectuer plusieurs observations intéressantes. Celles-ci sont résumées dans le tableau 6.1.

Entre autres, ce tableau met en évidence le fait que les coûts d'inventaires ont, au niveau des coûts logistiques totaux, un poids beaucoup moins important que les coûts de transport. En effet, si les coûts d'inventaires représentent moins de 5% des coûts totaux, pourquoi les entreprises accordent-elles autant d'importance à la gestion de leurs stocks ? De nombreuses raisons expliquent ce phénomène. Une des principales raisons vient du fait qu'un taux élevé de rotation des stocks est synonyme d'un excellent flux de matière à travers la chaîne d'approvisionnement. En outre, cela signifie qu'une entreprise est capable d'offrir des produits diversifiés et de respecter de courts délais de livraison, tout en s'adaptant rapidement aux besoins du marché. Par conséquent, bien que les bénéfices économiques d'un taux élevé de rotation des stocks soient difficiles à quantifier, les entreprises manufacturières considèrent ce taux comme un des indicateurs de performance les plus importants. D'ailleurs, le taux de rotation des stocks influence directement le cours des actions de nombreuses entreprises d'envergure internationale. Bref, bien que les coûts d'inventaires semblent être négligeables par rapport aux coûts de transport, ils doivent tout de même être inclus dans les modèles d'optimisation globale. Ainsi, les entreprises cherchent à synchroniser leur chaîne d'approvisionnement afin d'atteindre un taux élevé de rotation des stocks, tout en minimisant les coûts logistiques.

À partir des différentes observations du tableau 6.1, il est possible d'établir un processus d'optimisation des opérations logistiques dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique. Les lignes directrices de ce processus sont présentées dans le tableau 6.2. En effet,

ce tableau expose différentes recommandations à suivre pour minimiser les coûts logistiques totaux, tout en assurant un flot de matière rapide et continu.

Tableau 6.1 - Résumé des observations

Hypothèse ou objectif	Résultat	Observation(s)
H1 Une gestion centralisée de l'approvisionnement permet de réduire considérablement les coûts logistiques, en comparaison à une gestion décentralisée.	Les résultats obtenus concordent avec l'hypothèse.	La centralisation permet de réduire considérablement les coûts de transport grâce aux opérations de consolidation et de transbordement. Pour une fréquence moyenne de livraison donnée, plus une usine est éloignée de ses fournisseurs, plus elle doit supporter des coûts logistiques élevés.
H2 L'augmentation des fréquences de livraison permet de réduire considérablement les coûts d'inventaires.	Les résultats obtenus concordent avec l'hypothèse.	La réduction des coûts d'inventaires est limitée par: - les inventaires en transit ; - les week-ends. Plus les fréquences de livraison augmentent, moins les inventaires diminuent. Pour une fréquence de livraison et une durée de transit données, il est possible de déterminer, analytiquement, la phase de livraison qui minimise les inventaires.
H3 Il est possible d'augmenter les fréquences de livraison sans accroître de façon considérable les coûts logistiques totaux.	Il s'agit de déterminer une plage de fréquences correspondant au niveau de service requis.	Les coûts d'inventaires représentent moins de 5% des coûts logistiques totaux. Il est possible d'augmenter « intelligemment » les fréquences de livraison de façon à favoriser les opérations de consolidation et, du même coup, limiter l'augmentation des coûts de transport.
H4 L'optimisation des phases de livraison permet de réduire significativement les coûts logistiques totaux.	Les résultats obtenus concordent avec l'hypothèse.	Appliquer une stratégie d'optimisation visant uniquement à réduire les inventaires en main est tout à fait inappropriée pour la réduction des coûts logistiques totaux. Optimiser les phases de livraison de façon à ce que les fournisseurs agglomérés dans une région expédient leurs commandes la (ou les) même(s) journée(s) permet de réduire considérablement les coûts de transport.
Quantification de l'impact de c sur C_{TOT}	Impact significatif.	Le paramètre c a un impact direct sur les coûts de transport. Il peut certes influencer le choix des stratégies de transport.
Quantification de l'impact de h sur C_{TOT}	Impact négligeable.	Bien que l'impact du paramètre h soit négligeable au niveau des coûts logistiques totaux, il a un impact important au niveau d'autres mesures de performance.
Quantification de l'impact de l_{moy} sur C_{TOT}	Impact significatif.	Parmi les trois paramètres étudiés, l_{moy} a l'impact le plus important sur les coûts logistiques totaux. La valeur de ce paramètre devrait guider le choix des stratégies d'optimisation à adopter.

Tableau 6.2 - Processus d'optimisation des opérations logistiques

Étape		Description
1	Centralisation (niveau stratégique de planification)	1.1 Évaluer la possibilité de centraliser la gestion des opérations logistiques d'approvisionnement. 1.2 Si l'étape 1.1 favorise la centralisation, mettre en œuvre les systèmes d'échanges informationnels nécessaires et développer le système d'optimisation des opérations de transport. Sinon, passer à l'étape 2.
2	Optimisation des fréquences de livraison (niveaux tactique et opérationnel de planification)	2.1 À partir d'un scénario de base, augmenter graduellement les fréquences de livraison (sans utiliser de stratégie particulière) afin de déterminer le niveau de service (f_{moy}) pouvant être pourvu aux usines approvisionnées. 2.2 Pour tous les couples (i, j) de la chaîne d'approvisionnement, optimiser les fréquences de livraison en fonction des stratégies suivantes: - pour un fournisseur i situé près d'une usine j ou d'un centre de consolidation et/ou de transbordement, augmenter la fréquence de livraison si la valeur ou le volume de la marchandise expédiée le justifie ; - si plusieurs fournisseurs sont agglomérés dans une région spécifique, augmenter les fréquences de livraison pour ses fournisseurs (pour toutes les usines approvisionnées); - pour un fournisseur i éloigné d'une usine j , réduire la fréquence de livraison si le volume de la marchandise expédiée ne justifie pas cette fréquence. 2.3 Pour optimiser davantage le scénario obtenu, utiliser une méthode de recherche locale pour générer et tester des solutions voisines.
3	Optimisation des phases de livraison (niveaux tactique et opérationnel de planification)	3.1 Ajuster les phases de livraison de façon à réduire les inventaires en main (cf. tableau 5.4). 3.2 Optimiser les phases de livraison de façon à ce que les fournisseurs d'une même région expédient leur marchandise la (ou les) même(s) journée(s). 3.3 Pour optimiser davantage le scénario obtenu, utiliser une méthode de recherche locale pour générer et tester des solutions voisines.
4	Contraintes opérationnelles (niveau opérationnel de planification)	4.1 Optimiser les opérations logistiques en fonction des contraintes opérationnelles et des imprévus en testant des scénarios alternatifs.

Comme il est possible de le constater, ce processus d'optimisation touche aux trois niveaux de planification (stratégique, tactique et opérationnel). La première étape concerne la centralisation de la gestion des opérations logistiques. Comme il a été prouvé grâce à l'expérimentation *E4*, la centralisation permet une réduction considérable des coûts logistiques totaux. Par contre, avant d'entreprendre la centralisation de ses opérations logistiques, une entreprise doit en évaluer les bénéfices (cf. tableau 2.1) et déterminer les coûts d'implantation. Par ailleurs, il est important de

rappeler qu'une entreprise qui ne possède pas un réseau de transport assez important pour profiter des avantages de la centralisation peut collaborer avec d'autres entreprises pour réduire ses coûts logistiques. Il s'agit du CTM (cf. section 2.1).

La seconde étape du processus d'optimisation, qui n'est pas conditionnelle à la première, consiste à optimiser les fréquences de livraison. D'abord, il s'agit de déterminer le niveau de service qui peut être pourvu aux usines approvisionnées, c'est-à-dire la fréquence moyenne de livraison (étape 2.1). Pour ce faire, il suffit de tester plusieurs scénarios en augmentant graduellement la fréquence moyenne de livraison, comme il a été réalisé à l'expérimentation *E1*. En fait, déterminer la fréquence moyenne « idéale » est un choix d'entreprise. Premièrement, il faut tenir compte de divers critères propres à l'entreprise pour déterminer le niveau de service minimal qui doit être pourvu aux usines. Deuxièmement, il faut étudier la variation des coûts logistiques totaux en fonction de la fréquence moyenne de livraison pour choisir la fréquence qui respecte le niveau de service minimal et qui n'engendre pas des coûts logistiques trop élevés.

Puis, à partir du scénario correspondant à la fréquence moyenne idéale, il s'agit d'optimiser les fréquences de livraison pour tous les couples (i,j) . En suivant les stratégies énumérées à l'étape 2.2 (cf. tableau 6.2), les coûts logistiques seront réduits et le niveau de service amélioré. Au besoin, il est possible d'utiliser une méthode de recherche locale pour optimiser davantage le scénario d'approvisionnement obtenu (étape 2.3).

La troisième étape vise l'optimisation des phases de livraison. Cette étape a été réalisée pour l'expérimentation *E3* et les résultats ont été très concluants.

Enfin, la dernière étape, qui concerne le niveau opérationnel de planification, consiste à optimiser les opérations logistiques en fonction des imprévus et des contraintes opérationnelles à considérer. Un système d'aide à la décision comme celui présenté à la figure 6.1 est nécessaire pour cette étape du processus, puisque des scénarios alternatifs doivent être générés et testés rapidement.

Bref, en appliquant les différentes étapes de ce processus d'optimisation, il est possible de réduire considérablement les coûts logistiques totaux, tout en assurant un niveau de service adéquat aux usines approvisionnées. Il est à noter que, étant donné l'évolution rapide des contraintes économiques avec lesquelles doivent composer les entreprises (prix du pétrole, prix

des pièces, demandes du marché, valeurs des actions à la bourse, *etc.*), il est nécessaire d'évaluer périodiquement les stratégies d'optimisation mises en place.

6.3. Expérimentations futures

Comme il a été possible de le constater, les expérimentations ont permis d'effectuer plusieurs observations et recommandations intéressantes. Par contre, certaines analyses demeurent incomplètes et d'autres possibilités d'amélioration méritent d'être étudiées. Cette section présente quelques expérimentations qui pourraient être réalisées afin de pousser davantage l'optimisation des opérations logistiques.

Tout d'abord, il serait intéressant de refaire les expérimentations *E1* à *E4* avec un échantillon comprenant quelques centaines de fournisseurs, et ce, afin d'évaluer l'impact de l'envergure du réseau de transport sur les différents coûts logistiques. En fait, un nombre élevé de fournisseurs devrait favoriser les opérations de consolidation et, du même coup, permettre d'augmenter la fréquence moyenne de livraison. D'ailleurs, c'est le phénomène qui se produit lorsque la gestion des opérations logistiques d'une entreprise possédant plusieurs usines est centralisée.

De plus, la localisation des différents centres de consolidation et/ou de transbordement pourrait aussi faire l'objet d'une étude approfondie. En analysant les résultats obtenus à la section 5, il a été possible de constater que le centre de transbordement *C1* (cf. figure 5.1) a été peu utilisé, même s'il est situé relativement près de plusieurs fournisseurs. En étant positionné de façon plus stratégique entre les fournisseurs et les usines, ce centre de transbordement aurait sans doute permis de réduire davantage les coûts logistiques totaux. En fait, le positionnement des différents centres de transbordement est un problème de localisation qui doit être résolu au niveau stratégique de planification, lors du développement du réseau de transport.

Enfin, il semble y avoir une opportunité d'amélioration au niveau de la division des commandes expédiées du fournisseur *i* à une usine *j* au cours de l'horizon de planification. Supposons qu'un fournisseur *i* expédie 100 m^3 de marchandise au fournisseur *j* durant la semaine et que deux livraisons sont effectuées. Selon la méthode de calcul utilisée dans ce mémoire, deux commandes de 50 m^3 seront expédiées au cours de la semaine. En supposant que la phase de livraison est {lundi ; jeudi} et que $t_{ij} = 3$ jours, le fournisseur expédiera une commande de 50 m^3 le lundi et une seconde commande identique le vendredi. Toutefois, il serait possible de réduire

l'inventaire moyen en expédiant $3/5$ (60 m^3) du volume total requis pour la semaine le vendredi, alors qu'une commande de 40 m^3 serait expédiée le lundi. Ainsi, il n'y aurait aucun inventaire à supporter au cours de la fin de semaine. Par conséquent, cette méthode de division des commandes permettrait de réduire les coûts d'inventaires. De plus, il serait aussi possible de diviser le volume des commandes de façon à optimiser les opérations de transport. Bien que cette autre méthode de division des commandes semble avoir un potentiel d'amélioration considérable, elle ajouterait un type de variable de plus au modèle.

Bref, ces expérimentations permettraient de mieux comprendre le comportement des chaînes d'approvisionnement à vaste étendue géographique et d'optimiser davantage les opérations logistiques.

CONCLUSION

L'optimisation globale de la chaîne d'approvisionnement est un domaine de recherche en plein essor. Que ce soit au niveau de la logistique inverse, d'approvisionnement ou de distribution, les entreprises cherchent à synchroniser l'ensemble de leurs opérations, dans le but d'accélérer les flux de matière et de réduire leurs coûts logistiques. Dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, les entreprises se butent à un défi de taille. En effet, elles doivent déterminer comment approvisionner leurs usines en JAT, sans toutefois encourir des coûts logistiques trop élevés.

Cette problématique s'est avérée le sujet de recherche de ce mémoire. Pour être en mesure d'étudier l'impact du JAT sur les coûts logistiques, deux objectifs principaux ont été fixés:

1. intégrer les activités de transport et de gestion des inventaires dans un modèle visant à minimiser les coûts logistiques totaux ;
2. développer un SAD permettant d'analyser le comportement d'un système logistique.

La revue de littérature a permis de constater qu'un système centralisé de gestion des opérations de transport s'avère l'outil idéal pour optimiser globalement les opérations logistiques d'une entreprise. Avec un tel système, il devient possible de piloter les opérations d'approvisionnement à l'aide de seulement deux types de variables, soit les fréquences et les phases de livraison. De plus, les problèmes de flot à coût minimum ont été identifiés comme étant les problèmes les mieux adaptés à la modélisation de réseaux de transport complexes.

Le SAD a donc été développé en fonction de ces observations. Ce SAD, qui permet de générer et d'évaluer divers scénarios d'approvisionnement, est composé de deux modules distincts. Le premier module est dédié au calcul des coûts d'inventaires, alors que le second permet d'optimiser les opérations de transport, et ce, à l'aide d'un problème de flot à coût minimum modélisant, à chaque période « active » de l'horizon de planification, la livraison des commandes à partir des fournisseurs jusqu'aux usines.

En comparaison aux modèles rencontrés dans la littérature, ce SAD comporte trois forces majeures. D'abord, l'optimisation globale des opérations logistiques est rendue possible grâce aux variables de décisions utilisées (les fréquences et les phases de livraison), qui ont un impact direct sur les coûts de transport, ainsi que sur les coûts d'inventaires. De plus, étant donné qu'il

est question d'une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique, les inventaires en transit sont pris en compte. Enfin, un réseau de transport complexe est modélisé. Bref, l'ensemble de ces caractéristiques a permis de modéliser une chaîne d'approvisionnement réelle, soit celle des usines nord-américaines de Paccar, et de réaliser plusieurs expérimentations qui se sont soldées par des résultats très intéressants.

D'abord, il a été possible de montrer que la centralisation de la gestion des opérations d'approvisionnement permet de réduire considérablement les coûts logistiques totaux (réduction de 25,5% pour le cas étudié). Par ailleurs, il a été observé que l'augmentation des fréquences de livraison permet de réduire les coûts d'inventaires (réduction de 22% pour le cas étudié), mais que plus la fréquence moyenne de livraison augmente, moins les coûts d'inventaires diminuent. De plus, les résultats ont montré que les coûts d'inventaires équivalent à moins de 5% des coûts logistiques. Donc, étant donné que les coûts de transport représentent la grande majorité des coûts logistiques, il n'est pas possible d'augmenter indéfiniment les fréquences de livraison sans faire gonfler les coûts encourus. Il est donc nécessaire de déterminer une plage de fréquences qui correspond au niveau de service visé par l'entreprise. Enfin, il a également été possible de montrer que l'optimisation des phases de livraison permet de réduire significativement les coûts logistiques totaux (réduction de 6% pour le cas étudié).

Les diverses observations effectuées suites aux expérimentations ont permis d'établir les lignes directrices d'un processus d'optimisation globale des opérations logistiques dans une chaîne d'approvisionnement à vaste étendue géographique. En effet, ce processus vise à assurer un niveau de service maximal aux usines approvisionnées, tout en minimisant les coûts logistiques totaux.

Le moteur d'optimisation nécessaire à la mise en application de ce processus doit être un SAD ayant une structure similaire à celui développé dans ce mémoire. Toutefois, comme il a été mentionné, ce SAD ne permet pas de résoudre rapidement des problèmes de transport dans lesquels il y a plus d'une centaine de commandes à livrer. De plus, la génération des scénarios est effectuée manuellement. Par conséquent, ce SAD n'est pas directement applicable en pratique. Néanmoins, en y greffant certains outils technologiques plus puissants, comme un module d'optimisation des opérations de transport basé sur des algorithmes mathématiques spécialisés, une méthode de recherche locale pour la génération des scénarios, ainsi qu'une base de données

ayant une plate-forme web, il serait possible de développer un SAD permettant de gérer, quotidiennement, les opérations logistiques d'une chaîne d'approvisionnement comportant des centaines de fournisseurs.

Pour une entreprise comme Paccar, qui possède déjà un système centralisé de gestion des opérations de transport (nommé PTS) et une base de donnée comprenant une plate-forme web, le développement d'un tel SAD devrait être sérieusement envisagé. En effet, il s'agirait d'intégrer, au système PTS, un module permettant de générer des scénarios d'approvisionnement, ainsi que le module de calcul des coûts d'inventaires présenté dans ce mémoire. Puis, en optimisant les fréquences et les phases de livraison en fonction des stratégies détaillées à la section 6, il serait possible de réduire les coûts logistiques totaux de façon considérable.

Bref, en ce qui concerne de futures recherches, il serait intéressant de se pencher sur le développement et l'intégration d'outils permettant de résoudre des problèmes de très grande taille en un court laps de temps. Ainsi, il serait possible de fournir aux logisticiens des modèles d'optimisation globale directement applicables en pratique. Le véritable défi consiste à développer des interfaces permettant d'intégrer les différents modèles et applications disponibles.

Finalement, au niveau de l'étude du comportement d'une chaîne logistique, plusieurs autres expérimentations devront être réalisées pour développer des stratégies d'optimisation encore plus efficaces. Entre autres, pour un fournisseur et une usine donnés, la division des commandes au cours de l'horizon de planification doit être étudiée en détail. Par ailleurs, il serait également intéressant de confirmer les résultats obtenus dans ce mémoire en résolvant des problèmes de plus grande taille.

RÉFÉRENCES

- AHN, B., SEO, K.-K. (2005). Multi-items ordering model considering transportation constraint on the inventory management. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 25:1. 88-92.
- ARNOLD, U. (1999). Organization of global sourcing: ways towards an optimal degree of centralization. *European Journal of Purchasing & Supply Management*. 5:3. 167-174.
- BAPTISTE, P. (2004). "Simulation et optimisation". IND6202 - SIMULATION. École Polytechnique de Montréal.
- BARUT, M., FAISST, W., KANET, J. (2002). Measuring supply chain coupling: an information system perspective. *European Journal of Purchasing & Supply Management*. 8:3. 161-171.
- BEAMON, B. (1998). Supply chain design and analysis: models and methods. *International Journal of Production Economics*. 55:3. 281-294.
- BEAMON, B. (1999). Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*. 19:3. 275-292.
- BERTAZZI, L., SPERANZA, M. (1999). Inventory control on sequences of links with given transportation frequencies. *International Journal of Production Economics*. 59:1-3. 261-270.
- BERTAZZI, L., SPERANZA, M., UKOVICH, W. (2000). Exact and heuristic solutions for a shipment problem with given frequencies. *Management Science*. 46:7. 973-988.
- BROWNING, B., WHITE, A. (2000). "Collaborative Transportation Management - A Proposal". *Logility [white paper]*. 12p.
- CHAN, F. (2003). Performance measurement in a supply chain. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 21: 7. 534-548.
- CHAN, F., QI, H. (2003). Feasibility of performance measurement system for supply chain: a process-based approach and measures. *Integrated Manufacturing Systems*. 14:3. 179-190.

- CHEN, J.-M., CHEN, T.-H. (2005). The multi-item replenishment problem in a two-echelon supply chain: the effect of centralization versus decentralization. *Computers & Operations Research*. 32:12. 3191-3207.
- CHEN, P., GUO, Y., LIM, A., RODRIGUES, B. (2006). Multiple crossdocks with inventory and time windows. *Computers & Operations Research*. 33:1. 43-63.
- CRAINIC, T.G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*. 122:2. 272-288.
- CRAINIC, T.G. (2002). "Long Haul Freight Transportation". *Handbook of Transportation Science*. R.W. Hall (Ed.). 2nd Edition. Kluwer.
- CTM SUB-COMMITTEE. (2003). "Collaborative transportation management: core elements of CTM (version 2.0)". *CTM Sub-Committee of CPFR*. 44p.
- CTM SUB-COMMITTEE. (2004). "Collaborative transportation management". *VICS Logistics Committee*. 32p.
- EKSIOGLU, S.D., ROMEIJN, H.E., PARDALOS, P.M. (2006). Cross-facility management of production and transportation planning problem. *Computers & Operations Research*. 33:11. 3231-3251.
- ESPER, T., WILLIAMS, L. (2003). The value of collaborative transportation management (CTM): its relationship to CPFR and information technology. *Transportation Journal*. 42:4. 55.
- FAVARETTO, D., PESENTI, R., UKOVICH, W. (2001). Discrete frequency models for inventory management - an introduction. *International Journal of Production Economics*. 71:1-3. 331-342.
- FAZEL, F. (1997). A comparative analysis of inventory costs of JIT and EOQ purchasing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 27:8. 496-504.
- GOETSCHALCKX, M., VIDAL, C., DOGAN, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: a review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*. 143:1. 1-18.

JOHNSON, G., STICE, J. (1993). Not quite just-in-time inventories. *The National Public Accountant*. 38:3. 26-29.

LAI, K.-H., NGAI, E., CHENG, T. (2002). Measures for evaluating supply chain performance in transport logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 38:6. 439-456.

LANGEVIN, A. (2004). "Problème de transport". MTH6414 - OUTILS ET LOGICIELS DE LA RECHERCHE OPÉRATIONNELLE EN INGÉNIERIE. École Polytechnique de Montréal.

LEE, C.-H. (2004). Inventory replenishment model: lot sizing versus just-in-time delivery. *Operations Research Letters*. 32:6. 581-590.

LI, D., O'BRIEN, C. (1999). Integrated decision modeling of supply chain efficiency. *International Journal of Production Economics*. 59:1-3. 147-157.

LI, Z., KUMAR, A., LIM, Y. (2002). Supply chain modeling: a co-ordination approach. *Integrated Manufacturing Systems*. 13:8. 551-561.

LUTZ, S., LÖEDDING, H., WIENDAHL, H.-P. (2003). Logistics-oriented inventory analysis. *International Journal of Production Economics*. 85:2. 217-231.

MEIXEL, M.J., GARGEYA, V.B. (2005). Global supply chain design: a literature review and critique. *Transportation Research Part E*. 41:6. 531-550.

QU, W., BOOKBINDER, J., IYOGUN, P. (1999). An integrated inventory-transportation system with modified periodic policy for multiple products. *European Journal of Operational Research*. 115:2. 254-269.

RAFELE, C. (2004). Logistic service measurement: a reference framework. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 15:3. 280-290.

ROBERTSON, P., GIBSON, P., FLANAGAN, J. (2002). Strategic supply chain development by integration of key global logistical process linkages. *International Journal of Production Research*. 40:16. 4021-4040.

- SHARMA, R.R.K., PRASAD, S. (2003). Obtaining a good primal solution to the uncapacitated transportation problem. *European Journal of Operational Research*. 144:3. 560-564.
- SHARMA, R.R.K., SHARMA, K.D. (2000). A new dual based procedure for the transportation problem. *European Journal of Operational Research*. 122:3. 611-624.
- SLATS, P., BHOLA, B., EVERS, J., DIJKHUIZEN, G. (1995). Logistic chain modeling. *European Journal of Operational Research*. 87:1. 1-20.
- SUTHERLAND, J. (2003). Collaborative transportation management - creating value through increased transportation efficiencies. *Business Briefing: Pharmagenetics*. 1-4.
- SWENSETH, S., GODFREY, M. (2002). Incorporating transportation cost into inventory replenishment decisions. *International Journal of Production Economics*. 77:2. 113-130.
- TOWILL, D., McCULLEN, P. (1999). The impact of agile manufacturing on supply chain dynamics. *International Journal of Logistics Management*. 10:1. 83-96.
- TYAN, J., WANG, F., DU, T. (2003). Applying Collaborative Transportation Management models in global third-party logistics. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 16:4-5. 283-291.
- TYWORTH, J., ZENG, A. (1998). Estimating the effects of carrier transit-time performance on logistics cost and service. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 32:2. 89-97.
- VAN LANDEGHEM, R., PERSOONS, K. (2001). Benchmarking of logistical operations based on a causal model. *International Journal of Operations & Production Management*. 21:1-2. 254-266.
- VAN NORDEN, L., VAN DE VELDE, S. (2005). Multi-product lot-sizing with a transportation capacity reservation contract. *European Journal of Operational Research*. 165:1. 127-138.
- VIDAL, C.J., GOETSCHALCKX, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*. 98:1. 1-18.

VOLMANN, T., BERRY, W., WHYBARK, D. (1997). "Manufacturing Planning and Control Systems". Irwin/McGraw-Hill.

YANG, J., PAN, J. (2004). Just-in-time purchasing: an integrated inventory model involving deterministic variable lead time and quality improvement investment. *International Journal of Production Research*. 42:5. 853-863.

ZHAO, Q.-H., WANG, S.-Y., LAI, K.-K., XIA, G.-P. (2004). Model and algorithm of an inventory problem with the consideration of transportation cost. *Computers & Industrial Engineering*. 46:3. 389-397.

ANNEXES

Annexe A : Liste des notations utilisées

(i,j)	fait référence au couple (i,j) : approvisionnement de l'usine j auprès du fournisseur i
c	taux de transport
c_f	coûts fixes
c_{fu}	coûts de transport du fournisseur f à l'usine u
c_j^l	coûts de transport pour parcourir le lien l à la fréquence j
c_v	coûts variables
c_0	coût fixe de transport par période
c_1	taux de transport économique
c_2	taux de transport normal
$c_{inv_{ij}}$	coûts pour supporter les inventaires du couple (i,j) durant l'horizon de planification
C_A	coûts de réapprovisionnement
C_{comm}	coûts de commande
C_{inv}	coûts d'inventaires
\overline{C}_{inv}	coûts d'inventaires moyens
C_{prod}	coûts de production
C_{rupt_s}	coûts engendrés par les ruptures de stock
C_S	coûts de stockage
C_{transp}	coûts de transport
\overline{C}_{transp}	coûts de transport moyens
C_{TOT}	coûts logistiques totaux
\overline{d}_{R_i}	délai moyen de réapprovisionnement pour la pièce i
d_{S_i}	durée de stockage de la pièce i
\overline{d}_{T_i}	durée moyenne de transit pour la pièce i
D	demande constante
D_H	demande totale pour l'horizon de planification
\overline{D}_i	demande moyenne pour la pièce i
D_i^t	demande de la pièce i à la période t
D_u	demande de l'usine u
D_{ut}	demande de l'usine u à la période t
f_{ij}	fréquence de livraison liée au couple (i,j) : nombre de livraisons par semaine

f_j^l	fréquence j sur le lien l
f_{moy}	fréquence moyenne de livraison pour tous les couples (i,j)
F_{ft}	fait référence au fournisseur f à la période t
h	pourcentage de la valeur des pièces qui sera imputé comme coût d'inventaires (% lié à une année complète d'entreposage)
h_{it}	coût pour maintenir en inventaire une unité de la pièce i durant la période t
h_i^l	coût pour maintenir en inventaire une unité de la pièce i au nœud l
h_{M_i}	coût annuel d'inventaire pour le stock en main (% de la valeur unitaire de la pièce i)
h_{T_i}	coût annuel d'inventaire pour le stock en transit (% de la valeur unitaire de la pièce i)
H	horizon de planification (nombre total de périodes considérées)
I_{ft}	nombre d'unités en inventaire au fournisseur f à la fin de la période t
I_i	quantité en stock de la pièce i
\bar{I}_{ij}	valeur moyenne des inventaires liés au couple (i,j) durant l'horizon de planification
I_i^l	inventaire de départ ($t = 0$) de la pièce i au nœud l
I_{it}	niveau d'inventaire de la pièce i à la fin de la période t
I_{it}^l	niveau d'inventaire de la pièce i au nœud l à la période t
J^l	ensemble des fréquences possibles sur le lien l
k_i	coût fixe pour commander la pièce i
K	coût fixe par commande
l_{moy}	distance moyenne séparant les fournisseurs des usines
L_{max}	distance maximale au-delà de laquelle les arcs $O-O$ ne sont pas créés
L_{ij}	distance entre les nœuds i et j
m	nombre total de nœuds dans le réseau de transport
M	représente un nombre élevé
O_f	capacité de production du fournisseur f
p_{ft}	nombre d'unités produites par le fournisseur f à la période t
p_{jt}^l	nombre de livraisons réalisées jusqu'à la période t sur le lien l à la fréquence j
$p1_t$	nombre de palettes transportées avec le taux de transport c_1 à la période t
$p2_t$	nombre de palettes transportées avec le taux de transport c_2 à la période t
q_{it}	quantité commandée de la pièce i à la période t
Q_i	quantité fixe de commande pour la pièce i
r_j^l	capacité du véhicule voyageant à la fréquence j sur le lien l

r^k	volume occupé par la commande k
R	volume maximal d'un chargement
R^2	coefficient de corrélation
s_i	point de commande de la pièce i
t_{ij}	durée de transit liée au couple (i,j)
t_j^l	nombre de périodes entre deux livraisons de fréquence j sur le lien l ($t_j^l = 1 / f_j^l$)
U_{ut}	fait référence à l'usine u à la période t
v_i	volume de la pièce i
v_{ij}	valeur totale des pièces permettant de couvrir les besoins durant l'horizon de planification pour le couple (i,j)
V_i	valeur unitaire de la pièce i
w^k	poids de la commande k
W	poids maximal d'un chargement
x_{fut}	nombre d'unités transportées du fournisseur f à l'usine u à la période t
x_{ij}^l	fraction de la demande de la pièce i livrée à la fréquence j sur le lien l
x_{ij}^k	variable binaire égale à 1 si la commande k passe par l'arc (i,j) , 0 sinon
X_c	variable indépendante représentant c
X_h	variable indépendante représentant h
X_{lmoy}	variable indépendante représentant l_{moy}
X_1	variable de décision: fréquences de livraison
X_2	variable de décision: phases de livraison
y_{it}	variable binaire égale à 1 si la pièce i est commandée à la période t , 0 sinon
y_{ij}	variable binaire égale à 1 si au moins une commande passe par l'arc (i,j) , 0 sinon
Y	réponse du système (coûts logistiques totaux)
z_{ij}	variable égale au nombre de camions qui doivent être utilisés pour livrer les commandes passant par l'arc (i,j)
z_j^l	nombre de véhicules qui suivent une fréquence j sur un lien l du réseau
\bar{z}	nombre moyens de camions nécessaire pour livrer les commandes passant par les arcs $C-U$ et $C-P$
α_{ij}	coefficient, composé de α_{ij}^1 et α_{ij}^2 , utilisé pour ajuster le calcul des inventaires en main
ρ_{ij}	phase liée au couple (i,j)
β	ensemble des arcs ayant un coût > 0 , c'est-à-dire les arcs qui modélisent le déplacement des camions

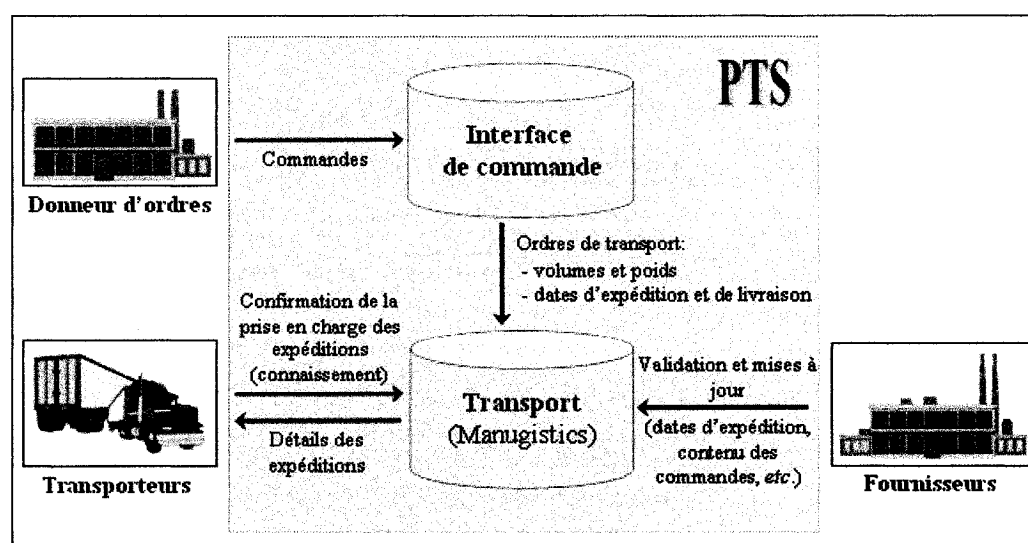
β^1	ensemble des arcs ayant un coût > 0 (excluant les arcs $C-U$ et $C-P$)
β^2	ensemble des arcs $C-U$ et $C-P$
β_{ij}	coefficient de régression de la variable indépendante i pour la variable de réponse j
δ	ensemble contenant tous les arcs du graphe
γ	ensemble des commandes
φ	ensemble des camions
$\gamma(j)$	ensemble des commandes effectuées par l'usine j
λ	ensemble des nœuds pour lesquels la conservation de flot s'applique
μ	ensemble des usines
ϖ	ensemble des arcs qui entrent dans les nœuds T (les camions)
τ	ensemble des arcs reliés aux commandes: $O-O$, $O-C$, $O-P$, $O-U$
ξ	erreur provenant de la modélisation du système
σ	facteurs incontrôlables
θ	coefficient utilisé pour ajuster le calcul de la distance à parcourir pour livrer les commandes des centres de transbordement aux usines
ε_j	effets inconnus et non observables erreur expérimentale pour la variable de réponse j

Annexe B : Exemple de SCGOT: *Paccar Transportation System*

Cette annexe fait un bref survol du système centralisé de gestion des opérations de transport (SCGOT) de Paccar, nommé PTS (Paccar Transportation System).

Paccar a débuté l'implantation du système PTS en juin 2005. Comme il est mentionné à la section 1.3, PTS est un SCGOT qui permet d'administrer l'acheminement des pièces des fournisseurs aux six usines d'assemblage nord-américaines de Paccar. L'entreprise désire également gérer, avec ce système, les opérations d'approvisionnement de deux de ses divisions, soit Dynacraft et Paccar Parts (division qui gère les pièces de rechange des différents points de service de Kenworth et Peterbilt, les deux marques de camions fabriquées par Paccar en Amérique du Nord).

Le système PTS est basé sur la technique du CTM. La gestion centralisée des opérations et la collaboration entre les partenaires commerciaux impliqués permettent d'optimiser globalement les activités logistiques. En effet, les usines, les fournisseurs et les transporteurs ont accès, en temps réel, aux informations liées aux commandes, ainsi qu'au transport via une plate-forme web. Au niveau des opérations de transport proprement dites, ce système permet, entre autres, de consolider les commandes de plusieurs usines pour optimiser les chargements. De plus, quatre centres de consolidation et transbordement sont disponibles dans le réseau de transport. La figure suivante présente les principaux processus informationnels du système PTS.



Processus informationnels du système PTS

Le système PTS est composé de deux modules: l'interface de commande et le module de transport. Lorsqu'une commande est effectuée par un donneur d'ordres (une usine) via l'interface de commande, le système calcule le volume et le poids de cette commande. Puis, en fonction de l'horaire d'expédition du fournisseur et de la durée de transit, ce module détermine la date d'expédition, ainsi que la date de livraison à l'usine. Ces informations constituent un ordre de transport.

L'ordre de transport est ensuite transmis au module de transport, qui s'avère le moteur d'optimisation du système PTS. En effet, ce module permet d'optimiser les opérations de transport de façon à minimiser les coûts nécessaires pour livrer tous les ordres de transport actifs dans le système. Concrètement, ce module forme les expéditions, c'est-à-dire qu'il détermine les ordres de transport (ou commandes) qui seront consolidés dans une remorque. Une fois qu'un chargement est formé, les informations correspondantes sont envoyées à un transporteur pour que celui-ci confirme sa prise en charge de l'expédition. Puis, lorsque l'expédition est confirmée par le transporteur, les fournisseurs sont en mesure de préparer leur ASN (*Advanced Shipping Notice*)²⁸. Il est à noter que, grâce aux différents points de contrôle tout au long du processus d'approvisionnement, il est possible d'effectuer un suivi serré des commandes.

Le système PTS est géré par Paccar en collaboration avec Manugistics, une tierce partie logistique. En fait, Manugistics joue un rôle important au niveau du module de transport. D'abord, ce 3PL possède les algorithmes mathématiques et les applications informatiques nécessaires à l'optimisation des opérations de transport. De plus, grâce à son important réseau de transporteurs, il est en mesure d'obtenir des taux de transport avantageux. Enfin, Manugistics assure la communication entre les différents acteurs du système, c'est-à-dire les usines, les fournisseurs et les transporteurs.

Bref, le système PTS est un exemple concret de l'application de la technique du CTM. En fait, l'implantation de ce SCGOT s'avère une belle opportunité pour réduire les coûts logistiques totaux, puisqu'il est plus simple de bâtir un modèle d'optimisation globale lorsque la gestion des opérations est centralisée.

²⁸ L'ASN est un document électronique, envoyé par le fournisseur à son client, qui détaille la marchandise qui sera expédiée.

Annexe D – Phases de livraison utilisées

Fréquence (livraison(s)/semaine)	Phase (jour(s) de réception des commandes)
1	lundi
1	mardi
1	mercredi
1	jeudi
1	vendredi
2	lundi, mardi
2	lundi, mercredi
2	lundi, jeudi
2	mardi, jeudi
2	mardi, vendredi
2	mercredi, vendredi
3	lundi, mardi, mercredi
3	lundi, mardi, jeudi
3	lundi, mardi, vendredi
3	lundi, mercredi, jeudi
3	lundi, mercredi, vendredi
3	mardi, mercredi, jeudi
3	mardi, mercredi, vendredi
3	mardi, jeudi, vendredi
4	lundi, mardi, mercredi, jeudi
4	lundi, mardi, mercredi, vendredi
4	lundi, mardi, jeudi, vendredi
4	lundi, mercredi, jeudi, vendredi
4	mardi, mercredi, jeudi, vendredi
5	lundi, mardi, mercredi, jeudi, vendredi